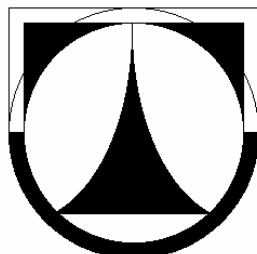


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA TEXTILNÍ**

KATEDRA NETKANÝCH TEXTILIÍ



**Diplomová práce**

STANOVENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ  
NANOVLÁKENNÝCH MEMBRÁN POMOCÍ  
MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

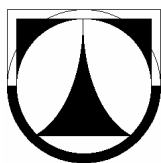
ASSESSMENT OF ACOUSTIC PROPERTIES FOR  
NANOFIBROUS MEMBRANES IN TERMS OF  
MECHANICAL TESTS



LIBEREC 2008

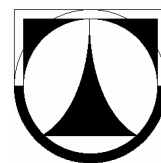
VERONIKA ŠAFÁŘOVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



FAKULTA TEXTILNÍ

KATEDRA NETKANÝCH TEXTILÍ



STANOVENÍ AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ  
NANOVLÁKENNÝCH MEMBRÁN POMOCÍ  
MECHANICKÝCH ZKOUŠEK

ASSESSMENT OF ACOUSTIC PROPERTIES FOR  
NANOFIBROUS MEMBRANES IN TERMS OF  
MECHANICAL TESTS

Veronika Šafářová

KNT – M3106

Vedoucí diplomové práce: Ing. Klára Kalinová, Ph.D.

Konzultant diplomové práce: Ing. Ondřej Novák

**Rozsah práce:**

stran	obrázků	tabulek	pramenů	příloh
83	81	10	73	11

V Liberci dne 10. května 2008

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta textilní**

**Katedra netkaných textilií**

**Školní rok: 2007/2008**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

Jména a příjmení: **Veronika ŠAFÁŘOVÁ**

Studijní program: **M3106 Textilní inženýrství**

Studijní obor: **Netkané textilie**

Název tématu: **Stanovení akustických vlastností nanovláknenných membrán pomocí mechanických zkoušek.**

### **Zásady pro vypracování:**

- 1) prostudujte teoretické poznatky o zvukově pohltivém a mechanickém chování rezonančních membrán, fólií a vláknenných materiálů
- 2) připravte sérii vzorků: nanovláknenné vrstvy různých plošných hmotností, síťované a nesíťované.
- 3) a) proměřte frekvenční závislost činitele zvukové pohltivosti vzorků v závislosti na parametrech nanovláknenných vrstev ve dvou různých vzdálenostech od odrazivé stěny  
b) stanovte vybrané mechanické vlastnosti nanovláknenných vrstev mající významný vliv na zvukovou pohltivost
- 4) diskutujte závěry a) vliv parametrů vzorků na průběh frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti b) vliv parametrů vzorků na jejich rezonanční frekvenci  
závislost akustických vlastností materiálů na vybraných mechanických vlastnostech

Rozsah grafických prací: 10  
Rozsah pracovní zprávy: 70  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná  
Seznam odborné literatury:

- 1) **Kolmer, F., Kyncl, J. Prostorová akustika. 1. vydání. SNTL Praha, 1980.**
- 2) **Zwikker, C., Kosten, C. W. Sound Absorbing Materials. Elsevier Pub. Co., NY, 1949.**
- 3) **Škvor, Z. Akustika a elektroakustika. 1. vydání Academia Praha, 2001. ISBN 80-200-0461-0.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Klára Kalinová, Ph.D.**  
Katedra netkaných textilií  
Konzultant diplomové práce: **Ing. Ondřej Novák**  
Katedra netkaných textilií  
Datum zadání práce: **11. října 2007**  
Datum odevzdání diplomové práce: **12. května 2008**

prof. Ing. Jiří Militký, CSc.  
děkan

prof. RNDr. David Lukáš, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. března 2008

## Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracovala jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušila autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 10. 5. 2008

.....

Podpis

## Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala Ing. Kláře Kalinové, Ph.D. za odborné vedení, poskytnuté informace a doporučení při zpracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat za cenné rady a četné konzultace Ing. Ondřeji Novákovi, Prof. RNDr. Bohuslavu Střížovi, DrSc. a celému technickému zázemí Katedry netkaných textilií Technické univerzity v Liberci. Děkuji také své rodině za veškerou podporu během celého studia.

## ANOTACE

Tato diplomová práce se zabývá stanovením akustických vlastností nanovláknenných membrán pomocí mechanických zkoušek.

První část práce obsahuje teoretické poznatky o šíření a podstatě pohlcování zvuku. Dále popisuje princip elektrostatického zvlákňování a statické zkoušky protržení. Druhá část práce se zabývá samotným experimentem. Studuje vliv parametrů kruhové nanovláknenné membrány na průběh činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku. Dále se zabývá stanovením rezonanční frekvence nanovláknenných vzorků pomocí modulu pružnosti, který je určen z dat získaných zkouškou CBR. Na základě těchto měření je vyhodnocen vliv různých parametrů na zjišťované veličiny.

**Klíčová slova:** nanovláknenná membrána, činitel zvukové pohltivosti, vlastní frekvence, modul pružnosti

## ANNOTATION

This thesis deals with an assessment of acoustic properties of nanofibrous membranes by means of mechanical tests.

The first part of the study contains theoretic findings about sound propagation and sound absorption substance. It also describes principle of electrostatic spinning and static tests of rupture. The second part deals with the experiment. It examines influence of circular nanofibrous membrane parameters on behaviour of sound absorption coefficient depending on sound frequency. It also deals with an assessment of resonant frequency of nanofibrous samples by means of stress modulus which is determine by data acquired by CBR test. On the bases of test data the influence of various parameters on determining values is evaluated.

**Key words:** nanofibrous membrane, sound absorption coefficient, natural frequency, stress modulus

# Obsah

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>13</b>
ÚVOD.....	13
2.1 TEORIE ZVUKU .....	14
2.1.1 Definice akustiky.....	14
2.1.2 Zvuk a hluk.....	14
2.1.3 Akustické vlnění .....	15
2.1.4 Základní akustické veličiny.....	16
2.2 ZVUK V UZAVŘENÉM PROSTORU .....	18
2.2.1 Akustické obklady pro pohlcování zvuku .....	19
2.2.1.1 Odraz a pohlcování zvuku .....	19
2.2.1.2 Mechanismus pohlcování zvuku .....	20
2.2.1.3 Činitel zvukové pohltivosti .....	21
2.2.1.4 Porézní materiály .....	23
2.2.1.5 Obklady založené na rezonančním principu .....	24
2.2.1.6 Metody měření činitele zvukové pohltivosti .....	27
2.2.2 Zvuková izolace prostoru.....	29
2.2.2.1 Zvuková izolace a vzduchová neprůzvučnost .....	29
2.3 TEORIE VÝROBY NETKANÝCH TEXTILÍ .....	30
2.3.1 Princip procesu elektrostatického zvlákňování .....	31
2.3.2 Zařízení pro elektrostatické zvlákňování .....	32
2.3.2.1 Zařízení pro výrobu plošných útvarů, metoda Nanospider.....	32
2.4 STATICKÁ ZKOUŠKA PROTRŽENÍ (ZKOUŠKA CBR) .....	33
2.4.1 Zkušební stroj LabTest 4.050.....	33
2.5 REŠERŠE.....	34
2.5.1 Využití porézních a vláknenných materiálů v oblasti zvukové pohltivosti.....	35
2.5.2 Využití akustického rezonančního prvku v oblasti zvukové pohltivosti .....	37
2.5.3 Teoretické a experimentální poznatky o kmitání membrán .....	45
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>48</b>
3.1 Cíl .....	48
3.2 POSTUP EXPERIMENTU .....	48
3.3 VÝROBA MEMBRÁNY .....	48
3.4 ZJIŠTĚNÍ TLOUŠTKY NANOVLÁKENNÉ VRSTVY .....	51
3.5 MĚŘENÍ ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI .....	52
3.5.1 Vyhodnocení měření .....	53
3.5.2 Statistické vyhodnocení.....	55
3.6 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	58
3.6.1 Vyhodnocení měření .....	58
<b>4 VÝSLEDKY A DISKUSE.....</b>	<b>63</b>
4.1 VLIV PLOŠNÉ HMOTNOSTI NANOVLÁKENNÉ VRSTVY NA HODNOTY ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	63
4.2 VLIV PARAMETRU SÍŤOVÁNÍ NANOVLÁKENNÉ VRSTVY NA HODNOTY ČINITELE ZVUKOVÉ POHLTIVOSTI.....	65



4.3	<i>VLIV VZDÁLENOSTI PRVKU OD ODRAZIVÉ STĚNY NA HODNOTY Činitele zvukové pohlivosti</i> .....	67
4.4	<i>VLIV PLOŠNÉ HMOTNOSTI VZORKU NA JEHO REZONANČNÍ FREKVENCI (STANOVENÉ POMOCÍ MĚŘENÍ Činitele zvukové pohlivosti)</i> .....	69
4.5	<i>VLIV PLOŠNÉ HMOTNOSTI VZORKU NA JEHO REZONANČNÍ FREKVENCI (VYPOČTENÉ POMOCÍ MODULU PRUŽNOSTI)</i> .....	71
4.6	<i>ZÁVISLOST REZONANČNÍ FREKVENCE (STANOVENÉ POMOCÍ MĚŘENÍ Činitele zvukové pohlivosti) NA MODULU PRUŽNOSTI VZORKU</i> .....	73
<b>ZÁVĚR</b> .....		<b>75</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA</b> .....		<b>77</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....		<b>83</b>

## Seznam symbolů

<b>a</b>	[m]	délka desky
<b>a<sub>i</sub></b>	[-]	koeficient nutný pro stanovení vlastní frekvence
<b>B</b>	[dB]	hladina intenzity zvuku
<b>b</b>	[m]	šířka desky
<b>c</b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlost zvuku
<b>D</b>	[dB]	stupeň zvukové izolace
<b>d</b>	[m]	tloušťka vzduchové mezery
<b>E</b>	[Pa]	modul pružnosti
<b>F<sub>r</sub></b>	[N]	celková napínací síla membrány
<b>f</b>	[Hz]	frekvence zvuku
<b>f<sub>r</sub></b>	[Hz]	rezonanční (vlastní) frekvence
<b>h</b>	[m]	tloušťka rezonančního prvku
<b>I</b>	[W.m <sup>-2</sup> ]	intenzita zvuku
<b>I<sub>i</sub></b>	[W.m <sup>-2</sup> ]	intenzita dopadajícího zvuku
<b>I<sub>r</sub></b>	[W.m <sup>-2</sup> ]	intenzita odraženého zvuku
<b>I<sub>α</sub></b>	[W.m <sup>-2</sup> ]	intenzita pohlceného zvuku
<b>L</b>	[dB]	hladina intenzity zvuku
<b>l<sub>p</sub></b>	[m]	tloušťka panelu
<b>m</b>	[kg]	hmotnost
<b>m<sub>1</sub></b>	[kg.m <sup>-2</sup> ]	plošná hmotnost membrány
<b>P</b>	[N]	zatěžující síla
<b>P<sub>1,2</sub></b>	[dB]	hladiny akustických tlaků
<b>p</b>	[Pa]	akustický tlak
<b>R</b>	[m]	poloměr kruhové membrány
<b>R</b>	[Pa.s.m <sup>-3</sup> ]	vlnový odpor
<b>R<sub>0</sub></b>	[-]	celkový činitel zvukové odrazivosti
<b>r<sub>0</sub></b>	[m]	poloměr protlačovaného tělesa
<b>S</b>	[m <sup>2</sup> ]	plocha
<b>S<sub>1</sub></b>	[m <sup>2</sup> ]	plocha průřezu dutiny

<b>S<sub>2</sub></b>	[m <sup>2</sup> ]	plocha rezonátoru
<b>T</b>	[s]	perioda
<b>u</b>	[m.s <sup>-1</sup> ]	akustická rychlost
<b>V</b>	[m <sup>3</sup> ]	objem prostoru
<b>W</b>	[W]	akustický výkon
<b>w</b>	[m]	posunutí středu kruhového vzorku textilie
<b>Z</b>	[Pa.s.m <sup>-3</sup> ]	akustická impedance
<b>z</b>	[m]	hloubka vzduchové mezery
<b>Z<sub>0</sub></b>	[kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> ]	charakteristický vlnový odpor
<b>α</b>	[-]	činitel zvukové pohltivosti
<b>β</b>	[-]	činitel zvukové odrazivosti
<b>ε</b>	[-]	poměrná deformace
<b>θ</b>	[°]	úhel dopadu rovinné vlny
<b>λ</b>	[m]	vlnová délka
<b>ρ</b>	[kg.m <sup>-3</sup> ]	měrná objemová hmotnost
<b>σ</b>	[-]	Poissonova elastická konstanta
<b>σ<sub>t</sub></b>	[N.m <sup>-1</sup> ]	tahové napětí
<b>υ</b>	[N.m <sup>-1</sup> ]	radiální napínací síla
<b>τ</b>	[-]	součinitel průzvučnosti
<b>ω</b>	[s <sup>-1</sup> ]	úhlová rychlost

# 1 Úvod

Výzkum nanotechnologií a nanomateriálů se stal obrovskou výzvou vědeckým a výzkumným pracovníkům. Jednoznačně již bylo prokázáno, že rozměrová oblast 1-500 nm, dříve v podstatě opomíjená, obsahuje klíč k řešení mnoha specifických problémů v nejrůznějších oborech vědy a techniky.

Mezi prudce se rozvíjející nanotechnologie patří také elektrostatické zvlákňování. Tato technologie umožňuje výrobu polymerních vláken s průměrem od několika nanometrů do jednoho mikronu. Vláknata takovýchto rozměrů mají výjimečnou strukturu a vlastnosti umožňující speciální využití v mnoha oborech.

Na lidstvo v normálním životním prostředí působí velké množství zvuků příjemných i nepříjemných. Pokud jsou zvuky v hladinách, které jsou obtěžující nebo rušivé nazýváme je hlukem. Nejen průmyslový, ale i hudební hluk ve vyšších hladinách škodí lidskému sluchu a může vyvolávat jeho trvalé poškození. Dále hluk působí na lidskou psychiku, může způsobovat neurózy, stres a jiné obtíže. Odpovídajícím výběrem a umístěním akustických systémů je možno omezit nežádoucí zvuky, zvýšit míru soukromí v rámci daného prostoru, zlepšit srozumitelnost projevu či ovlivnit pocit pohody u člověka [1]. Z výše uvedeného vyplývá, jak důležité je zabývat se otázkou pohlcování zvuku.

Nanovláknenné materiály mají jedinečnou schopnost pohlcovat zvuk při nízkých frekvencích a současně neztrácí schopnost pohlcovat vyšší zvukové frekvence. Nanovláknenná vrstva tvoří funkci membrány, rezonující na nízkých frekvencích. Tento charakter je dán nanorozměry mezivláknenných prostor. Často je používána pavučina, která zajišťuje dostatečný útlum rezonující membrány tak, aby co největší množství zvukové energie, nashromážděné v rezonátoru, bylo převedeno na teplo [2].

Tyto zvukoabsorpční vlastnosti nanovláknenných vrstev lze uplatnit v mnoha odvětvích. Mohou jimi být komponenty pro automobilový průmysl, letecký průmysl nebo stavebnictví. Dále to mohou být materiály určené pro protihluková řešení zvukových studií, koncertních sálů, přednáškových síní, divadel, kin, učeben, stadionů, průmyslových hal a dalších.

Tato práce se zabývá akustickými vlastnostmi samotné nanovlákněné vrstvy, která v systému tvoří funkci membrány. Studuje vliv parametrů vzorků na průběh frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti a na jejich rezonanční frekvenci. Dále zkoumá závislost akustických vlastností materiálu na vybraných mechanických vlastnostech.

V teoretické části práce jsou uvedeny základní fyzikální poznatky a principy zabývající se problematikou šíření zvuku. Dále je nastíněna podstata pohlcování zvuku a metody zjišťování této veličiny. Na závěr je zmíněn princip technologie elektrostatické výroby nanovlákněných vrstev a statické zkoušky protržení.

Experimentální část studuje pohltivé vlastnosti kruhových nanovlákněných membrán vyrobených z roztoku polyvinylalkoholu o různých plošných hmotnostech (26,3; 17,7; 8,8; 4,1 a 2,1 g.m<sup>-2</sup>) a rozdílném splnění parametru síťování. Nanovrstvy jsou uchyceny na nosném papírovém mezikruží. Studovaná vrstva je umístována ve dvou odlišných vzdálenostech od odrazivé stěny (30 a 50 mm), tím se mění velikost vzduchové mezery a tedy i významný účinek zvukové pohltivosti vzduchem.

Dále se pak zabývá stanovením rezonanční frekvence nanovlákněných membrán pomocí modulu pružnosti, jež je vypočítán z dat získaných statickou zkouškou protržení.

Zjištěné údaje jsou vyhodnoceny a je posuzován vliv jednotlivých parametrů na činitel zvukové pohltivosti. Dále jsou porovnávány závislosti akustických vlastností vzorků stanovené pomocí měření pohltivosti s akustickými vlastnostmi zjištěnými z dat mechanické zkoušky.

## 2 Teoretická část

### Úvod

Z hlediska prostorové akustiky je jednou z hlavních vlastností uzavřených prostorů doznívání hladiny akustického tlaku po vypnutí zdroje zvuku. Doznívání akustické energie, definované *dobou dozvuku*  $T$  se řídí Sabineho vztahem:

$$T = 0,16 \frac{V}{\sum_{0-n} S_n \alpha_{S_n}}, \quad (1)$$

kde:  $V$  – objem uzavřeného prostoru [ $\text{m}^3$ ],

$S_n$  – součet ohraničujících ploch [ $\text{m}^2$ ],

$\alpha_{S_n}$  – činitel zvukové pohltivosti ohraničujících ploch [-].

Ze vzorce vyplývá, že možnost změny doby dozvuku podle požadavků prostorové akustiky spočívá u daného uzavřeného prostoru pouze ve změně činitele zvukové pohltivosti ohraničujících ploch. Součin  $S_n \cdot \alpha_{S_n}$  pak nazýváme pohltivostí  $A$  udávanou v  $\text{m}^2$  „otevřeného okna“. Pohltivost ohraničujících ploch má vliv také na poměry v akustickém poli uzavřeného prostoru i při ustáleném stavu. Z tohoto hlediska je významnou veličinou poloměr doznívání, který určuje poloměr koule kolem zdroje, v níž převládá energie přímá, zatímco v prostoru mimo tuto kouli převládá energie odražená od ohraničujících ploch. *Poloměr doznívání* je dán vztahem:

$$r_h = \frac{\sqrt{A}}{4\sqrt{\pi}} = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} = 0,141 \sqrt{A}. \quad (2)$$

Jestliže zvýšíme pohltivost stěn nějakého uzavřeného prostoru, změní se i hladina akustického tlaku v oblasti odražených vln, tedy mimo poloměr doznívání podle vztahu:

$$p_1 - p_2 = 20 \log \sqrt{\frac{A_2}{A_1}}, \quad (3)$$

kde:  $p_1$  – hladina akustického tlaku v prázdném uzavřeném prostoru [dB],

$p_2$  – hladina akustického tlaku v prostoru se zvýšenou hodnotou  $A$  [dB],

$A_1$  – pohltivost ohraničujících ploch v prázdném uzavřeném prostoru [ $\text{m}^2$ ],

$A_2$  – pohltivost ohraničujících ploch v prostoru se zvýšenou hodnotou  $A$  [ $\text{m}^2$ ].

Zatímco doba dozvuku daná vzorcem (1) je důležitým kritériem prostorové akustiky při návrhu akustického řešení kulturních prostor jako jsou divadla, koncertní a přednáškové síně, učebny a posluchárny, pak snížení hladiny akustického tlaku dle vzorce (3) a poloměr doznívání dle vzorce (2) jsou důležitým kritériem pro snižování hladiny akustického tlaku rušivého hluku v továrních a nádražních prostorech, ve sportovních halách apod.

Je zřejmé, že v obou těchto případech hraje rozhodující roli velikost pohltivosti ohraničujících ploch daná u daného prostoru pouze velikostí **činitele zvukové pohltivosti**. Činitel zvukové pohltivosti ohraničujících ploch poskytuje výraznou možnost regulace akustických vlastností uzavřeného prostoru.

Předchozí odstavce byly převzaty z [3].

## 2.1 Teorie zvuku

### 2.1.1 Definice akustiky

Akustika je obor zabývající se fyzikálními jevy spojenými se vznikem zvukového vlnění, jeho šířením a vnímáním zvuku sluchem. Patří vedle mechaniky a optiky k nejstarším částem fyziky a v historii fyziky sehrála významnou úlohu při rozvoji poznání přírody [4].

### 2.1.2 Zvuk a hluk

Zvuk je jakékoli chvění pevného, kapalného nebo plynného prostředí v oboru slyšitelných kmitočtů, tj. 16 Hz až 16kHz. Mechanické vlnění s frekvencí menší než 16 Hz nazýváme infrazvuk, frekvenci větší než 16kHz má ultrazvuk [5].

Zvuk zprostředkovává člověku informace o okolním světě. Celý tento děj přenosu informací si můžeme představit jako přenosovou soustavu, která má tři základní části. Jsou jimi zdroj zvuku, prostředí, kterým se šíří a přijímač zvuku. V nejjednodušším případě je přijímačem zvuku lidské ucho [4].

Od svého zdroje se může zvuk šířit do okolí jen v některých z uvedených prostředí. Ve vakuu se zvuk nešíří. Nejběžnějším prostředím je vzduch, ve kterém se

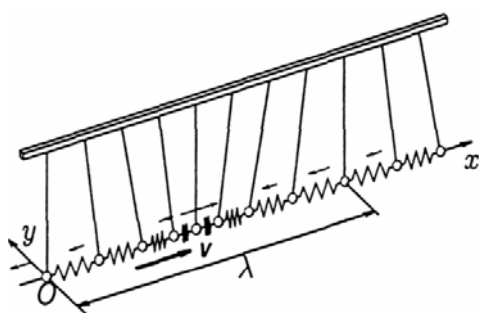
zvuk (stejně jako v jiných plynech a kapalinách) šíří podélným vlněním. Částice vzduchu přenášejí zvuk tím, že kmitají kolem rovnovážné polohy ve směru šíření vln. V důsledku toho dochází ke střídavému zhuštění a zředění vzduchu, které se v prostoru projevuje časovými i prostorovými změnami tlaku. Tyto změny, jejichž původcem je zdroj zvuku, mohou probíhat periodicky a také neperiodicky [5].

Hlukem označujeme každý nežádoucí zvuk, který vyvolává nepříjemný nebo rušivý vjem nebo poškozuje lidské zdraví. Hluk má tedy dvě stránky, kvantitativní a kvalitativní. Kvantitativně je zvuk určen objektivně měřitelnými veličinami jako je např. intenzita, doba expozice. Zatímco kvalita zvuku je vždy subjektivní záležitostí a je dána vztahem zdroj – posluchač [6].

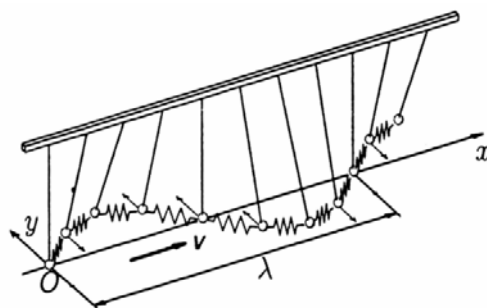
Vysoké hodnoty hladin hluku jak v pracovním a obytném prostředí, tak často i v rekreačních oblastech vytvořily situaci, jejíž pozitivní ovlivnění se stává z celospolečenského hlediska nezbytnou potřebou [7].

### 2.1.3 Akustické vlnění

Zvuk se může šířit v plynech, kapalinách i pevných látkách ve formě akustického vlnění. V homogenním izotropním prostředí se šíří přímočaře. Podle toho, zda částice kmitají ve směru šíření vlnění nebo kolmo k němu, rozlišujeme vlnění na podélné a příčné. U podélného vlnění (obr. 1) je směr kmitů dán jednoznačně směrem šíření vlnění, zatímco u příčného vlnění (obr. 2) musíme udávat též rovinu, ve které dochází k příčným kmitům. Pokud se všechny kmity dějí v jedné rovině, říkáme o takovém vlnění, že je lineárně polarizované [7].



Obr. 1: Postupné vlnění podélné dle [8].



Obr. 2: Postupné vlnění příčné dle [8].



Důležitou skutečností je, že se částice jednosměrně nepohybují se šířícím se vlněním, ale kmitají pouze kolem svých rovnovážných poloh. Šíření vln není spojeno s přenosem látky. Vlněním se však přenáší energie [7].

U kapalin a plynů se může vyskytovat pouze podélné akustické vlnění, protože tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. U materiálů elastických se může vyskytovat vlnění podélné i příčné. Je tomu tak z důvodu pružnosti nejenom v tahu a tlaku, ale i smyku [7].

Jestliže se pružným prostředím šíří vlnění ze dvou nebo více zdrojů, jednotlivá vlnění postupují prostředím nezávisle. Avšak v místech, kde se vlnění setkávají, dochází k jejich skládání. Nastává **interference vlnění** a výsledkem je složená zvuková vlna. Významný případ interference vlnění nastává tehdy, jestliže dvě vlnění o stejné amplitudě výchylky a stejné frekvenci postupují pružným prostředím v opačném směru, tedy proti sobě. K tomu dochází zejména při šíření vlnění v omezeném prostoru (např. v tyči). Vlnění postupuje až k okraji pružného prostředí, tam se odráží a postupuje v opačném směru. Přímé a odražené vlnění se skládají a vzniká **stojaté vlnění** [8].

Jestliže vlnění dospěje k rozměrné překážce, např. na rozhraní mezi dvěma prostředím, v nichž se vlnění šíří různou rychlostí, pak se od překážky vlnění odráží, nebo rozhraním dvou prostředí prochází. Na překážce nastává **odraz a lom vlnění** [8].

Pokud vlnění dopadá na překážku malých rozměrů, pozorujeme, že vlnění dospělo i za překážku. V této situaci tedy nastává **ohyb vlnění** neboli **difrakce** [8].

#### 2.1.4 Základní akustické veličiny

**Rychlost zvuku**  $c$  [ $\text{m.s}^{-1}$ ] - je nejdůležitější charakteristikou prostředí z hlediska šíření zvuku. Zvuk se šíří do svého okolí přenášením kmitů jedné částice na druhou. Rychlost zvukové vlny je závislá na fyzikálním stavu prostředí. Rychlost zvuku ve vzduchu závisí na složení vzduchu, ale nejvíce na jeho teplotě. Ve vzduchu o teplotě  $t$  v Celsiových stupních má zvuk rychlost:

$$c = 331,7 + 0,6 \cdot t \quad (4)$$

V praxi počítáme s rychlostí zvuku ve vzduchu při normální teplotě  $344 \text{ m.s}^{-1}$ . Rychlost zvuku není ovlivněna tlakem vzduchu a je stejná pro zvuková vlnění všech

frekvencí. V kapalinách a pevných látkách je rychlost zvuku větší než ve vzduchu [9]. Přibližné hodnoty rychlosti zvuku v různých prostředích jsou uvedeny v tabulce 1.

Prostředí	Rychlost zvuku [m.s <sup>-1</sup> ]	Prostředí	Rychlost zvuku [m.s <sup>-1</sup> ]
vzduch	344	voda 21,5°C	1484
kyslík	317	led	3200
vodík	1270	ocel	5000
metan	432	guma	50

Tab. 1: Rychlosti zvuku v různých prostředích dle [9].

**Akustický tlak**  $p$  [Pa] - je definován jako projev akustické energie v místě působení, to znamená tam, kde je akustický tlak odlišný od tlaku barometrického. Lze snadno měřit [6]. Zvukový tlak klesá úměrně se vzdáleností [9]. Barometrický tlak nabývá hodnot kolem  $10^5$  Pa, akustický tlak se pohybuje v rozmezí  $2 \cdot 10^{-5}$  až  $2 \cdot 10^2$  Pa.

**Akustická rychlost**  $\vec{u}$  [m.s<sup>-1</sup>] - je rychlost, jakou kmitají částice vzduchu při šíření zvuku. Je fyzikálně rovnocenná akustickému tlaku, avšak na rozdíl od něj má směr i velikost, tudíž je to vektorová veličina. Lze měřit, ale principy měření se pro značnou složitost nepoužívají [6].

**Intenzita zvuku**  $\vec{I}$  [W.m<sup>-2</sup>] - je měřítkem akustické energie procházející jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření zvukové vlny. Je to vektorová veličina. Intenzita zvuku je dána vztahem dle [6]:

$$\vec{I} = p \cdot \vec{u} . \quad (5)$$

**Hladina intenzity zvuku**  $B$  [dB] - je veličina, která určuje logaritmickou stupnici pro měření síly zvuku. Je dána vztahem:

$$B = 10 \log \frac{I}{I_0} , \quad (6)$$

kde:  $I_0$  - intenzita odpovídající prahu slyšení [10].

**Akustický výkon**  $W$  [W] - v určitém místě je dán zvukovou energií akustické vlny prošlé plochou kolmou na směr šíření zvuku za jednotku času. Je měřítkem

celkové zvukové energie procházející plochou. Akustický výkon je definovaný integrálem skalárního součinu:

$$W = \int_{(S)} \vec{I} \cdot \vec{dS}, \quad (7)$$

kde:  $\vec{dS}$  - vektor o velikosti  $|dS|$  ležící ve směru normály na plochu,

$S$  - plocha, na které stanovujeme akustický výkon [6].

**Hlasitost** [1 son] - je subjektivní míra zvukového vjemu. Vyjadřuje, jak silně působí zvuk na normální sluch. Subjektivní míra zvuku, vnímaná lidským uchem, se velice liší od objektivní síly zvuku, tedy intenzity zvuku. Obor slyšitelnosti je omezen zdola spodním prahem slyšitelnosti (práh slyšení) a shora horním prahem slyšitelnosti (práh bolesti). Oblast zvuků ohraničená uvedenými dvěma prahy se nazývá sluchové pole [10].

**Vlnová délka**  $\lambda$  [m] - je dráha, kterou proběhne střídavá veličina v jedné periodě. Počet kmitů za vteřinu udává **kmitočet** (frekvence)  $f$  [Hz]. **Perioda**  $T$  [s] je nejkratší doba, po kterou se děj opakuje. Tyto tři základní veličiny jsou na sobě vzájemně závislé dle těchto vztahů:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad T = \frac{1}{f}, \quad (8, 9)$$

kde:  $c$  - rychlost šíření vlnění v  $\text{m.s}^{-1}$  [9].

## 2.2 Zvuk v uzavřeném prostoru

Ze zkušenosti víme, že mluvené slovo je v interiéru silnější a srozumitelnější než v exteriéru. Právě tak je tomu s hudbou, která vyzní v uzavřeném prostoru daleko lépe než venku. Důvodem pro to je skutečnost, že zvuk vycházející ze zdroje se odráží mnohonásobně od stěn a předmětů a více či méně rovnoměrně vyplní celý prostor akustickou energií [11].

### 2.2.1 Akustické obklady pro pohlcování zvuku

Dobré akustické podmínky uzavřených prostorů vyžadují mimo jiné takovou úpravu, aby doba dozvuku byla optimální. Aby se toho dosáhlo, provádějí se úpravy pohltivosti stěn tak, že se maximálně využívá pohltivých vlastností některých látek a konstrukcí. Při vytváření akustického návrhu je tedy vhodné znát míru jejich schopnosti pohlcovat zvuk.

Akustické materiály pro pohlcování zvuku není možno zaměňovat s materiály, které zlepšují zvukové izolace stavebních či jiných konstrukcí, protože pohltivé akustické obklady mají velice nízký stupeň vzduchové neprůzvučnosti.

Z hlediska pohlcování zvuku můžeme obklady rozdělit do tří skupin: obklady tvořené porézními materiály, obklady založené na principu rezonance a složené pohltivé konstrukce. Kromě uvedených druhů obkladů pohlcují zvuk i různé užitkové a okrasné materiály, u nichž není pohltivost primární vlastností. Pro návrh prostoru je ovšem také nutné znát jejich pohltivost [5].

#### 2.2.1.1 Odraz a pohlcování zvuku

Velmi různé rozdělení intenzity nebo hustoty zvuku nastává v uzavřeném prostoru. Na stěnách totiž dochází jednak k odrazu, jednak k pohlcování zvukových vln. Odraz zvukových vln podle zákona odrazu nastává jen na překážkách, jejichž délkové rozměry jsou větší než vlnová délka zvuku [13].

Při každém odrazu zvuku na rozhraní vzduch – pevná látka (případně kapalina), dojde k odrazu neúplnému, část energie vnikne do pevné látky, zbytek se vrací zpět do prostoru. Z hlediska prostoru – místnosti, je ta část energie, která vnikla do stěny ztracená – pohlcená. Platí:

$$I_i = I_r + I_a, \quad (10)$$

kde:  $I_i$  – intenzita dopadajícího zvuku,

$I_r$  – intenzita odraženého zvuku,

$I_a$  – intenzita pohlceného zvuku [11].

### **2.2.1.2 Mechanismus pohlcování zvuku**

Pojem pohlcování zvuku lze tedy definovat jako nevratnou přeměnu zvukové energie v energii jinou. Z tohoto hlediska můžeme principy přeměny zvukové energie při šíření v pevných látkách dělit na tři skupiny:

- a) přeměny vznikající třením;
- b) přeměny vznikající poklesem akustického tlaku;
- c) přeměny vznikající nepružnou deformací těles.

K přeměně zvukové energie v tepelnou třením dochází tam, kde se vzduch pohybuje v blízkosti pevné stěny. Pokud se má takovým způsobem přeměnit větší množství zvukové energie, musí být plocha, na níž nastává tření, dostatečně veliká. Proto se k takovému pohlcování zvuku dobře hodí látky porézní, u nichž je celková plocha značně veliká vzhledem k jejímu objemu.

Pokud akustický obklad tvoří deska nebo stěna, která je schopna mechanických kmitů v oblasti zvukového spektra, rozkmitá se vlivem dopadajících zvukových vln. Část mechanické energie se opět mění v energii akustickou, která vyzařuje do prostoru na touto překážkou. Zbytek mechanické energie se mění v energii tepelnou vlivem tření v kmitající překážce.

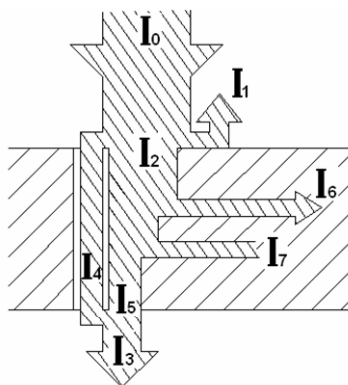
Druhou skupinou jsou přeměny vznikající následkem zmenšení akustického tlaku. Pokud dochází k šíření vlnění látkou, potom v místech, ve kterých nastává zhuštění částic, stoupá zároveň celkový tlak. Jestliže dojde ke zmenšení neboli relaxaci akustického tlaku, zmenší se nashromážděná potenciální energie a tím se zmenší i energie zvukové vlny. Příčin relaxace je několik, může být například způsobena přestupem tepla, která má za následek snížení teploty a tedy i zmenšení tlaku.

K přeměně zvukové energie vlivem nepružné deformace těles dochází u těch látek, které vykazují tzv. pružnou hysterezi. Stlačíme-li takovou látku určitou silou, nevrátí se do původního stavu ani když síla přestane působit. Práce vynaložená na deformaci je tedy větší než práce získaná pružností tělesa zpět při návratu do původního tvaru. Rozdíl těchto hodnot představuje úbytek zvukové energie vlivem nedokonalé pružnosti.

Předchozí odstavce byly převzaty z [5].

### 2.2.1.3 Činitel zvukové pohltivosti

Jednou z nejdůležitějších akustických vlastností obkladu je činitel zvukové pohltivosti. Co se děje s akustickou energií při dopadu na nějakou překážku ukazuje schéma na obr. 3.



Obr. 3: Schéma dopadu akustické energie na překážku dle [7].

Akustický výkon dopadající na 1 m<sup>2</sup> stěny, označený jako intenzita zvuku  $I_0$ , se rozdělí na část:

- a)  $I_1$  – intenzita zvuku vlny odražené,
- b)  $I_2$  – intenzita zvuku vlny pohlcené,
- c)  $I_3$  – celková intenzita vlny vyzářené za stěnu,
- d)  $I_4$  – intenzita zvuku vlny prošlé za stěnu otvory a póry,
- e)  $I_5$  – intenzita zvuku vlny, kterou stěna vyzáří v důsledku svého ohybového kmitání do druhého poloprostoru,
- f)  $I_6$  – intenzita zvuku vlny, která je vedena ve formě chvění do ostatních částí přiléhajících konstrukcí,
- g)  $I_7$  – intenzita zvuku přeměněná ve stěně na teplo.

Schopnost nějakého tělesa pohlcovat zvuk charakterizujeme hodnotou činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$ , který je definován jako poměr energie  $I_2$ , pohlcené určitou plochou, k energii  $I_0$ , která na tuto plochu dopadá. Tento vztah vyjadřuje výraz:

$$\alpha = \frac{I_2}{I_0}. \quad (11)$$

Činitel zvukové pohltivosti je bezrozměrné číslo a nabývá hodnot od 0 do 1. Stěna dokonale pohlcující zvuk má činitel pohltivosti  $\alpha = 1$ , zatímco stěna, která zcela zvuk odráží má tento činitel roven nule.

Obdobným způsobem lze definovat činitele zvukové odrazivosti  $\beta$  a činitele průzvučnosti  $\tau$ :

$$\beta = \frac{I_1}{I_0}, \quad \tau = \frac{I_3}{I_0} = \frac{I_4 + I_5}{I_0}. \quad (12, 13)$$

Při navrhování zvukoizolačních konstrukcí je nutné znát podíl akustické energie přeměněné ve stěně na teplo. Další veličinou je činitel přeměny  $\varepsilon$ , který vyjadřuje podíl mezi energií přeměněnou ve stěně na teplo a energií na stěnu dopadající. Potom platí vztah:

$$\beta + \tau + \varepsilon = 1. \quad (14)$$

Předešlé odstavce byly převzaty z [7].

Pro některé účely se také hodí veličina pohltivost  $A$ , která závisí na činiteli zvukové pohltivosti a ploše stěny:

$$A = \alpha \cdot S, \quad (15)$$

která v případě, že se stěna skládá z více částí o různých činitelích pohltivosti přejde na tvar:

$$A_{celk.} = \sum \alpha_i \cdot S_i, \text{ dle [12].} \quad (16)$$

Velikost činitele zvukové pohltivosti dále závisí na velikosti akustické impedance  $Z$ , která se jeví na lícové rovině obkladu. Prostá velikost impedance se skládá podle vztahu (17) z reálné složky  $R$  a imaginární složky  $X$ :

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (17)$$

Akustické pole tvořené rovinnými zvukovými vlnami pak vykazuje charakteristický vlnový odpor  $Z_0$ :

$$Z_0 = \rho_0 \cdot c_0 \text{ [kg.m}^{-2}\text{.s}^{-1}\text{]}, \quad (18)$$

kde:  $\rho_0$  – měrná objemová hmotnost vzduchu [kg.m<sup>-3</sup>],

$c_0$  – rychlost šíření zvukových vln ve vzduchu [m.s<sup>-1</sup>].

Z vlnové rovnice, popisující zvukové pole rovinných vln dopadajících kolmo na obklad a od obkladu odražených lze odvodit vztah mezi činitelem zvukové pohltivosti, složkami akustické impedance a vlnovým odporem:

$$\alpha = \frac{4 R Z_0}{(R + Z_0)^2 + X^2} \quad (19)$$

Předešlé odstavce byly čerpány z [3].

Závěrem lze konstatovat, že tento činitel je závislý na úhlu dopadu zvukových vln a na frekvenci dopadajícího zvuku. Informativní hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro různé materiály a různé frekvence jsou uvedeny v tabulce 2.

Materiál	Frekvence $f_m$ [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Hladký beton	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
Stěny obložené dřevem	0,10	0,11	0,10	0,08	0,08	0,11
Koberce kokosový	0,15	0,07	0,10	0,19	0,28	0,79
Plst' technická na zdi	0,12	0,18	0,32	0,60	0,88	0,88
Těžké záclony	0,06	0,10	0,38	0,63	0,70	0,73

Tab. 2: Hodnoty činitele pohltivosti různých materiálů dle [7].

#### 2.2.1.4 Porézní materiály

Porézní materiály jsou nejdůležitějším materiálem, používaným pro konstrukci akustických obkladů. Vyznačují se vysokou porézností, to znamená, že objem skeletu porézního materiálu (u vláknitých materiálů objem vláken) tvoří 1 až 20 % celkového objemu materiálu. Kostra materiálu má buď vláknitou strukturu nebo strukturu ztuhlé pěny [3].

Vlastní pohlcování zvuku, tedy přeměna akustické energie v energii tepelnou, se děje v mezní vzduchové vrstvě u povrchu vláken nebo kostry vlivem viskózních sil. V mezní vrstvě dochází ke vzájemnému tření vrstev vzduchu mezi sebou, přičemž vrstva vzduchových částic na povrchu vláken nebo kostry je v klidu a vrstva vzduchových částic na druhém kraji mezní vrstvy koná pohyb odpovídající akustické rychlosti ve středu sledovaného průřezu [5].



Porézní materiály dělíme na porézní materiály vláknité, kanálkové a pěněné. Jiné rozdělení je možné dle vlastností materiálu, ze kterého je zhotoven skelet porézního obkladu. Rozlišujeme materiály z organických, minerálních, skleněných a plastických hmot. Všeobecné požadavky na porézní materiály pro použití v akustických obkladech jsou: nehořlavost, soudržnost skeletu, nízká měrná plošná hmotnost, dostatečný měrný akustický odpor, snadná opracovatelnost a nízká cena [3].

### **2.2.1.5 Obklady založené na rezonančním principu**

Způsob pohlcování energie akustickým obkladem může také vycházet z teorie tlumených rezonátorů. Dopadají-li zvukové vlny na akustický rezonátor, výsledkem jsou vynucené kmity, které dosahují maximální amplitudy pro rezonanční frekvenci  $f_r$ . Pro tuto frekvenci může v závislosti na tlumení rezonátoru dosáhnout činitel zvukové pohltivosti až 1. Obklady na rezonančním principu můžeme podle konstrukce dělit na kmitající membrány, kmitající desky a Helmholtzovy rezonátory. Důležitou vlastností rezonátorů je jev doznívání, což je dokmitávání rezonátoru na rezonančním kmitočtu po zániku budící vlny [12]. Ve všech případech je možno najít ekvivalentní zjednodušený mechanický model, viz práce [5].

**Kmitající membrána** je tenká deska nebo fólie s malou ohybovou tuhostí upevněná v určité vzdálenosti od stěny, viz obr. 4. Membrána koná především základní kmity. V praxi se do části vzduchové mezery přidává pohltivý často porézní materiál, čímž se dosahuje zvýšení činitele pohltivosti a rozšíření pásma tlumených frekvencí [12].

Rezonanční frekvence netlumené membrány za předpokladu malé výchylky je dle [5] dána vztahem:

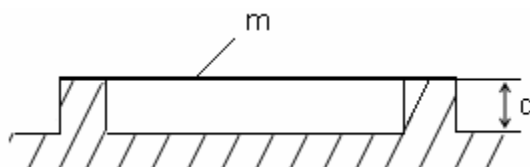
$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho S}{m d}} \text{ [Hz]}, \quad (20)$$

kde:  $m$  - hmotnost membrány [kg],

$S$  - plocha membrány [ $\text{m}^2$ ],

$d$  - tloušťka vzduchové mezery [m],

$\rho$  - hustota vzduchu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ].



Obr. 4: Model kmitající membrány.

Kmitání a vlnění tenkých kruhových membrán je popisováno v práci [14]. Tenká kruhová membrána je v této práci definována jako útvar, který vznikne napnutím např. tenké homogenní elastické fólie s konstantní plošnou hmotností na tuhý rám kruhového tvaru. Tímto napnutím vyvolaným radiálně působící silou membrána získá svoji tuhost. Radiálně působící napínací síla vztažená na jednotku délky obvodu rámu je ve všech směrech konstantní a rovna vztahu:

$$\nu = \frac{F_r}{2\pi R} \text{ [N.m}^{-1}\text{]}, \quad (21)$$

kde:  $F_r$  - celková napínací síla [N],

$R$  - poloměr membrány, neboli poloměr tuhé kruhové podpory [m].

Rychlost příčné vlny šířící se na membráně je popisována vztahem:

$$c_M = \sqrt{\frac{\nu}{m_1}} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, \quad (22)$$

kde:  $m_1$  – plošná hmotnost [ $\text{kg.m}^{-2}$ ].

Při úvaze osově souměrných kmitů platí pro úhlovou rychlost:

$$\omega_{0,i} = \frac{a_{0,i} c_M}{R} \text{ [s}^{-1}\text{]}, \quad (23)$$

kde:  $a_{0,i}$  – koeficienty nutné pro stanovení rezonanční frekvence, uvedené v tabulce 3.

Dále pro stanovení úhlové rychlosti platí vztah:

$$\omega_{0,i} = 2\pi f_{0,i} \text{ [s}^{-1}\text{]}. \quad (24)$$

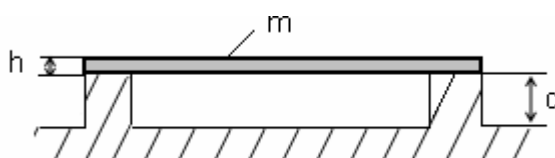
Po úpravě je možno vyjádřit rezonanční frekvenci:

$$f_{0,i} = \frac{a_{0,i} c_M}{2\pi R} \text{ [Hz]}. \quad (25)$$

$(n=0), i$	1	2	3	4
$a_{0,i}$	2,4048	5,5201	8,6537	11,7915

Tab. 3: Hodnoty  $a_{0,i}$  symetrických volných kmitů kruhové membrány dle [14].

**Kmitající desky** se od membrán liší především svou tuhostí v ohybu, která obvykle tuhost vzduchového polštáře značně převyšuje. Ve srovnání s membránou se u desek kromě základních kmitů uplatňují i kmitů vyšších řádů. Potřebné tlumení kmitajících desek se dosáhne vyplněním dutiny mezi deskou a stěnou vhodným porézním materiálem. Kmitající deska je schematicky zobrazena na obr. 5 [7].



Obr. 5: Model kmitající desky.

Vlastní frekvence homogenní obdélníkové desky o rozměrech  $a \times b$  a tloušťce  $h$  upevněné po krajích jsou dány vztahem:

$$f_{p,q} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho c^2 S}{m d} + \frac{\pi^4 S}{m} \left[ \left( \frac{p}{a} \right)^2 + \left( \frac{q}{b} \right)^2 \right] \frac{E h^3}{12(1-\sigma^2)}} \text{ [Hz]}, \quad (26)$$

kde:  $S$  – plocha desky [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ],

$m$  – hmotnost desky [ $\text{kg}$ ],

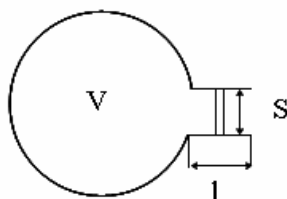
$E$  – modul pružnosti desky [ $\text{Pa}$ ],

$\sigma$  – Poissonova elastická konstanta [-],

$d$  – vzdálenost desky od stěny [ $\text{m}$ ],

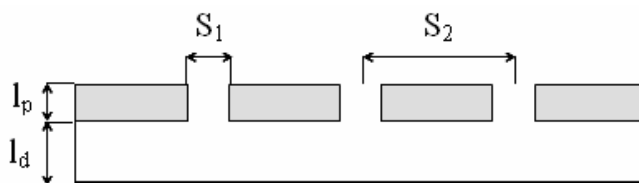
$p, q$  – udávají mód kmitů [-] dle [5].

Obklady na bázi **Helmholtzova rezonátoru** lze použít pro libovolné spektrum frekvencí. Schematicky je Helmholtzův rezonátor znázorněn na obr. 6, je tvořen dutinou o určitém objemu  $V$ , opatřenou hrdlem, v níž se nachází určitá hmota vzduchu. Objem rezonátoru se chová jako poddajnost, píst reprezentuje akustickou hmotnost [7].



Obr. 6: Schéma Helmholtzova rezonátoru.

Jen zřídka se Helmholtzovy rezonátory používají izolovaně, samostatně. Často jsou však používány tzv. děrované panely (obr. 7), které jsou tvořeny tuhou deskou umístěnou v určité vzdálenosti od stěny opatřenou kruhovými či kuželovými otvory [7].



Obr. 7: Schéma perforovaného panelu.

Oproti ostatním konstrukcím mají řadu výhod. Je to především možnost nastavit změnou geometrie otvorů kmitočet maximálního pohlcování v širokém pásmu kmitočtů, možnost zhotovení perforované desky z jakéhokoli materiálu, dostatečná mechanická pevnost a možnost různé povrchové úpravy [3].

Frekvence děrovaného panelu je dle [7] dána výrazem:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_1}{S_2 l_p d_p}} \text{ [Hz]}, \quad (27)$$

kde:  $S_1$  – plocha průřezu dutiny [ $\text{m}^2$ ],

$S_2$  – plocha rezonátoru [ $\text{m}^2$ ],

$l_p$  – tloušťka panelu [m],

$d_p$  – vzdálenost od stěny [m].

### 2.2.1.6 Metody měření činitele zvukové pohltivosti

Činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  je možno zjišťovat několika způsoby. Patří mezi ně měření v dozvukové komoře, metoda odražené vlny, metoda měření intenzity zvuku a zjišťování pomocí impedanční trubice.

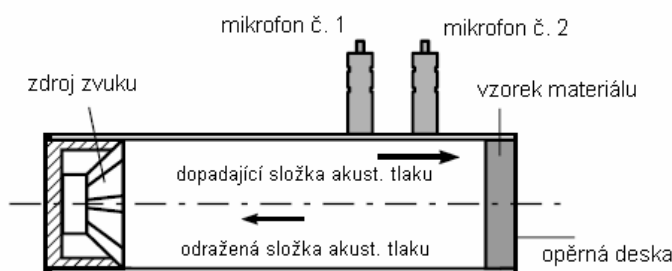
**Měření pomocí dozvukové komory** spočívá v určení dvojí doby dozvuku, ze které se poté vypočítá podle Sabinova vzorce hledaný činitel  $\alpha$ . Měří se doba dozvuku prázdné dozvukové místnosti a poté následuje měření doby dozvuku s vloženým měřeným vzorkem. Výhodou této metody je všesměrový dopad zvuku. Mezi nevýhody patří nezbytnost velké místnosti s nerovnoběžnými stěnami a nutnost vzorků velkých rozměrů [11].

**Metoda odražené vlny** umožňuje určení činitele zvukové pohltivosti pro různé úhly dopadu zvukové energie. Principem této metody je vysílání akustického impulsu proti dokonale odrazivé podložce, na které je umístěn měřený vzorek a snímání jeho amplitudy po odrazu. Měření je však z hlediska laboratorních podmínek velice náročné, i když nevyžaduje rozměrnou dozvukovou komoru [11].

**Metodu měření intenzity zvuku** lze použít pro všesměrový dopad zvukových vln. Měřený vzorek je umístěn v dozvukové komoře spolu se širokopásmovým zdrojem hluku. Měří se průměrná hladina intenzity zvuku a akustického tlaku v blízkosti vzorku a podle vzorce se vypočte činitel zvukové pohltivosti [15].

**Dvou mikrofónová impedanční měřicí trubice** se používá k měření akustických charakteristik malých testovaných vzorků. Nevýhodou je měření zvukové pohltivosti pouze pro kolmý dopad zvuku, protože se tento dopad vln v praxi vyskytuje jen výjimečně. Další nevýhodou je použití jen velice malého vzorku, který zastupuje celou vláknennou vrstvu.

Dvou mikrofónová impedanční trubice Brüel & Kjaer typu 4206 (obr. 8) se používá pro měření akustických charakteristik jako jsou činitel zvukové pohltivosti, činitel zvukové odrazivosti, normovaná impedance a admitance ve frekvenčním rozpětí 50 Hz až 6,4 kHz. Tato metoda měření činitele zvukové pohltivosti spočívá v rozkladu širokopásmového stacionárního náhodného signálu do jeho dopadající a odražené složky [16].



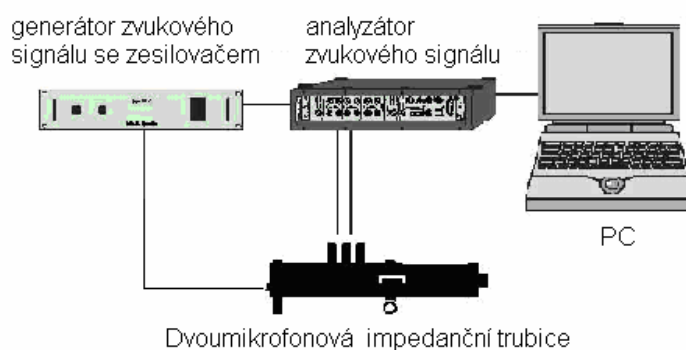
Obr. 8: Průřez Dvou mikrofónovou impedanční trubicí dle [16].

Princip měření spočívá v dopadu signálu, který je vytvářen zdrojem, na vzorek materiálu umístěný na opačném konci trubice, viz obr. 8. Mikrofony na stěně trubice snímají složky dopadajícího a odraženého akustického tlaku, pomocí nichž je možno vypočítat tři přenosové funkce. Z těchto získaných hodnot lze určit celkový činitel

zvukové odrazivosti  $R_0$  dle [17]. Výsledný činitel zvukové pohltivosti lze stanovit pomocí následujícího vzorce:

$$\alpha = 1 - |R_0|^2, \text{ převzato z [17].} \quad (28)$$

Měřicí soustava (obr. 9) se skládá z Dvou mikrofónové impedanční trubice, generátoru náhodného zvukového signálu se zesilovačem, analyzátoru signálů a výpočetní jednotky [16]. Metoda je popsána v technické normě ISO 10534-2.



Obr. 9: Zařízení k měření činitele zvukové pohltivosti dle [16].

## 2.2.2 Zvuková izolace prostoru

Důležitým subjektivním parametrem uzavřeného prostoru je hluk pozadí. Zejména u prostor, které jsou určeny k odpočinku nebo náročné duševní práci, může tento parametr hrát zásadní roli. Zajištění dostatečné zvukové izolace je klíčovým úkolem stavební akustiky [12].

### 2.2.2.1 Zvuková izolace a vzduchová neprůzvučnost

Pro akustickou pohodu uvnitř budov je třeba zabránit přenosu zvuku z jedné místnosti do druhé. Jestliže v první místnosti bude zdroj hluku s hladinou  $L_1$ , bude hladina hluku v druhé místnosti záviset nejen na izolačních vlastnostech dělícího členu, ale i na vlastnostech přijímací místnosti. Bude-li totiž mít druhá místnost vysokou celkovou pohltivost zvuku, nastaví se v ní hladina  $L_2$  na podstatně nižší úroveň. Pro získání vzduchové neprůzvučnosti samotné přičky, musíme nejprve zavést člen nazývaný stupeň zvukové izolace:

$$D = L_1 - L_2 \text{ [dB]}. \quad (29)$$

Pro činitel zvukové průzvučnosti platí vztah (13), podle obr. 3. Srovnáním pak pro stupeň zvukové izolace platí:

$$D = 10 \cdot \log \frac{1}{\tau}. \quad (30)$$

Stupeň vzduchové neprůzvučnosti  $R$  vypočteme ze stupně zvukové izolace  $D$  podle vztahu:

$$R = D + 10 \cdot \log \frac{S_1}{A} \text{ [dB]}, \quad (31)$$

kde:  $S_1$  – plocha dělicího členu,

$A$  – celková pohltivost na přijímací straně podle vztahu (15).

Předešlé odstavce byly převzaty z [11].

## 2.3 Teorie výroby netkaných textilií

Netkaná textilie je definovaná jako vrstva vyrobená z jednosměrně nebo náhodně orientovaných vláken, spojených třením a/nebo kohezí a/nebo adhezí s výjimkou papíru a výrobků vyrobených tkaním, pletením, všíváním, proplétáním a plstěním.

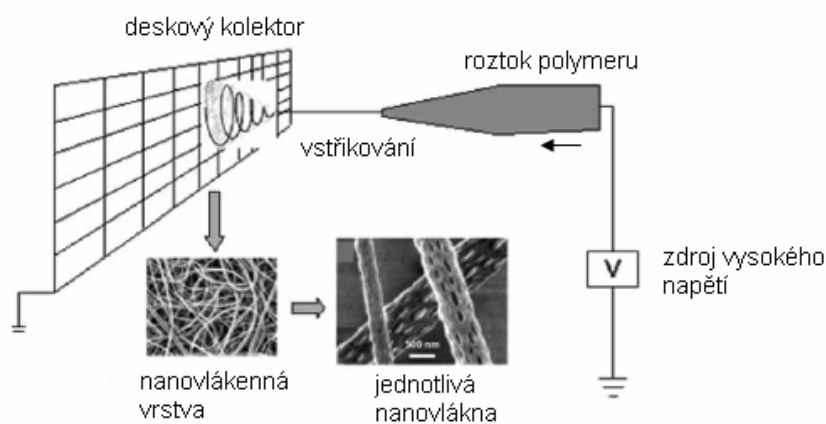
Způsob výroby závisí zejména na výchozích surovinách a na účelu použití výsledného produktu. Vlákenné vrstvy lze vyrábět mechanickými, aerodynamickými či hydrodynamickými způsoby, nebo jejich kombinacemi. V případě výroby z taveniny polymeru je to technologie spun-bond, melt-blown a elektrostatické zvlákňování [18].

Elektrostatickému zvlákňování je v současné době věnována velká pozornost, a to díky schopnosti vytvářet ultra jemná vlákna vyznačující se několika výjimečnými vlastnostmi. Jsou jimi velký měrný povrch, velká pórovitost a malé rozměry pórů. Tyto vlastnosti činí nanovlákna vhodnými kandidáty pro širokou škálu aplikací, jsou jimi např. filtry, výztuhy pro kompozitní materiály, zvukopohltivé materiály a mnohá další [19].

### 2.3.1 Princip procesu elektrostatického zvlákňování

Přestože slovo „electrospinning“ odvozené z „electrostatic spinning“ bylo použito relativně nedávno (kolem r. 1994), základní myšlenka je stará více jak sedmdesát let. Od roku 1934 do roku 1944 totiž Formhals publikoval sérii patentů [20-24] popisující experimentální zařízení určené k produkci polymerních vláken s využitím elektrostatické síly. Za posledních několik desítek let bylo podáno více než 50 patentů. Elektrostatické zvlákňování je nyní jednou z mnoha prudce se rozvíjejících nanotechnologií.

V procesu elektrostatického zvlákňování je využito vysoké napětí k vytvoření elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny. Elektroda, na níž je přivedeno vysoké napětí je spojena s polymerním roztokem, viz obr. 10. Roztok je následně zvlákňován z kapiláry. Mezi špičkou kapiláry a uzemněným kolektorem vzniká tzv. Taylorův kužel. Následuje vytlačování kapaliny. Vlákná ztuhnou po odpaření rozpouštědla a vytvoří vláknennou vrstvu na povrchu kolektoru [25].



Obr. 10: Schéma principu elektrostatického zvlákňování dle [25].

V důsledku zvyšující se intenzity el. pole se povrch roztoku formuje do kónického tvaru, známého jako Taylorův kužel [26]. Dalším zvýšením el. pole je dosaženo kritické hodnoty el. síly, která je schopna překonat povrchové napětí a viskoelastické síly na povrchu polymerního roztoku, a proto dojde k vypuzení nabitého proudu kapaliny ze špičky Taylorova kuželu. Vytékající proud polymerního roztoku prochází procesem nestability a dloužení, a tím se proud stane velmi dlouhým a tenkým. Současně dochází k odpaření rozpouštědla a vzniku polymerního vlákna [25].



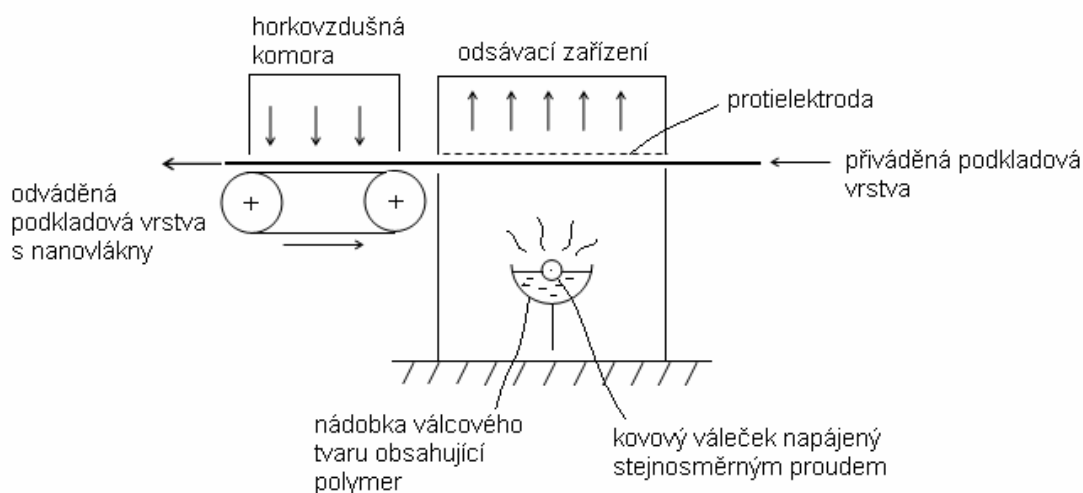
### 2.3.2 Zařízení pro elektrostatické zvlákňování

Existují různé typy zařízení pro elektrostatické zvlákňování. Nanovlákná vyrobená na těchto zařízeních jsou ve formě nanovláknenné vrstvy, ve které jsou vlákna náhodně uspořádána. Některé varianty zařízení mohou produkovat jednotlivá nanovlákná, nebo nanovláknenné jednoosé svazky.

#### 2.3.2.1 Zařízení pro výrobu plošných útvarů, metoda Nanospider

Tato metoda byla vyvinuta na Katedře netkaných textilií Technické univerzity v Liberci. Zařízení je patentováno v ČR, má i mezinárodní patent [27].

U tohoto zařízení je tryska obsahující polymerní roztok nahrazena nádobkou válcového tvaru. Tato nádobka je naplněna polymerním roztokem a uvnitř je umístěn kovový válec o délce 100 mm napájený stejnosměrným proudem. Při otáčení válce na jeho povrchu ulpívá vrstva polymerního roztoku. Při samotném zvlákňování je povrch válce pokryt velkým množstvím Taylorových kuželů. Nanovlákná jsou ukládána na nosnou textilní či netextilní vrstvu. Tvorba nanovláken je ještě podpořena odsáváním ve směru tvorby vláken, viz obr. 11.



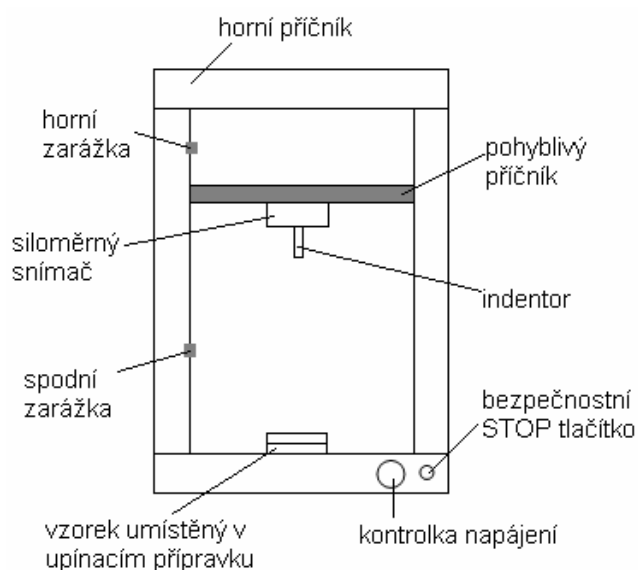
Obr. 11: Schématický nákres systému Nanospider.

## 2.4 Statická zkouška protržení (zkouška CBR)

Pro potřebu zjištění modulu pružnosti vzorku byl vybrána statická zkouška protržení, tzv. CBR test. Zkouška se provádí pomocí průbojníku s plochým koncem, který se posunuje konstantní rychlostí kolmo na střed zkušebního vzorku až do jeho protržení. Zaznamenává se síla potřebná k protlačení průbojníku, posun při protržení a křivka síla-posun [28].

### 2.4.1 Zkušební stroj LabTest 4.050

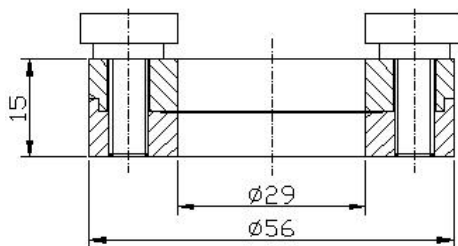
V této práci byl použit zkušební stroj LabTest 4.050. Stroje tohoto typu jsou určeny pro mechanické zkoušky v tahu, tlaku, ohybu, pro statická a dynamická namáhání a zkoušky vzorků i celých výrobků. Používají se při kontrole kvality výroby, při vstupních a výstupních kontrolách materiálu a zboží v širokém odvětví průmyslu a ve výzkumu a vývoji. Nedílnou součástí strojů LabTest je software LabTest v.3. Je to kompletní software pro testování materiálů v tahu, tlaku, ohybu, stříhu, cyklickém zatěžování a vrubové houževnatosti, který podporuje ČSN, DIN, EN, ISO, ASTM normy a jiné průmyslové standardní testovací metody. Součástí programu je přenos dat, řízení stroje, grafický záznam o provedené zkoušce, tabulka naměřených hodnot a statistický výpočet [29].



Obr. 12: Schéma zkušebního stroje LabTest 4.050.

Pohyblivý příčník (obr. 12) rozděluje rám stroje na dva pracovní prostory – horní a spodní. V případě použití přístroje pro zkoušku pevnosti v tlaku je využíváno pouze spodního prostoru. Před vlastním začátkem měření je nutno otevřít soubor zkoušek a vytvořit vlastní definici měření. Soubor definice určuje, jakým způsobem bude zkouška probíhat a jaké výpočty se nad naměřenými daty provedou. Dále slouží k zadávání vstupních parametrů nutných pro řízení stroje a vlastní výpočet.

Samotné měření probíhá volbou pracovního prostoru zkušebního stroje, následuje zapnutí vhodného konektoru do panelu periférií, otevření souboru a definice. Dále je třeba upevnit vhodný indentor (průbojník) do siloměrného snímače. V dalším kroku následuje umístění vzorku do upínacího zařízení. V této práci byl měřený vzorek upínán do přípravku (obr. 13), který je umístěn na spodní části rámu stroje. Následuje spuštění chodu stroje, kdy se příčník začne pohybovat podle nastavené definice a software zachytí měřené veličiny. Měření končí uložením, případně tiskem naměřených dat.



Obr. 13: Schéma upínacího přípravku umístěného na spodní části rámu stroje.

## 2.5 Rešerše

V současné době je známa řada modelů, které slouží k predikci hodnoty činitele zvukové pohltivosti. Prostudovány byly akustické vlastnosti velkého množství materiálů (textilních či netextilních) a akustických prvků různého složení. Zvukově pohltivé vlastnosti prvků obsahující nanovláknenné materiály ovšem doposud nebyly plně prozkoumány. Je tomu tak díky poměrně mladé, avšak plně se rozvíjející technologii.

### 2.5.1 Využití porézních a vláknenných materiálů v oblasti zvukové pohltivosti

Významným přínosem v této oblasti je model zabývající se šířením zvuku porézním flexibilním médiem, který byl představen C. Zwikkerem a C. W. Kostenem v roce 1949 [30]. Autoři nahlíželi na porézní materiál jako na směs dvou fází, vzduchu a pevné látky, které odlišně reagují na dopadající zvukovou vlnu. Tento model slouží k predikci hodnot některých podstatných charakteristik vláknenných vrstev a následnému využití pro navrhování velice efektivních akustických prvků obsahující textilie. Mohou jimi být například obklady zdí, akustické bariéry či zavěšené akustické podhledy [31-34].

M. E. Delany a E. N. Bazley [35] navrhli empirický vzorec, který sloužil k odhadu charakteristické impedance a koeficientu šíření zvuku vláknenných materiálů. Nevýhodou tohoto vzorce však byla nevhodnost použití pro velmi nízké a vysoké frekvence. V práci [36] bylo analyzováno šíření zvuku vláknenným materiálem s použitím zobecněného pojetí akustického šíření porézním prvkem. Nezbytné konstanty byly odvozeny z idealizovaného modelu nakupených válců. Bylo shledáno, že tloušťka a orientace vláken jsou hlavním ovlivňujícím činitelem.

M. D. Dahl ve své práci [37] experimentálně studoval akustické chování ohebných vláknenných materiálů. Zkoumaný materiál se sestával z vláken válcového tvaru, uspořádaných v rounu. Proměřován byl jak kolmý, tak i šikmý dopad zvukových vln. J. F. Allard a Y. Champoux [38] navazují na práci M. E. Delanyho a E. N. Bazleye, poskytují obdobné predikce rovnic již dříve publikovaných a rozšiřují použití těchto rovnic i při nízkých frekvencích. Model využívá předpokladu, že šíření zvuku ve vláknenném materiálu závisí zejména na průměru vláken a hustotě materiálu.

Studie uvedená autory Y. Shoshanim a Y. Yakubovem [39] rozšířila Zwikkerův a Kostenův model za účelem predikce činitele zvukové pohltivosti slyšitelného kmitočtového pásma pro akrylové, bavlněné a polyesterové vláknenné pavučiny. Uvádějí, že samotné netkané textilie mají vyšší činitel zvukové pohltivosti při vysokých frekvencích (nad 2000 Hz) ve srovnání s jinými vláknennými materiály jako je sklolaminát či minerální plst'. Ve své další práci [40] použili model pro šíření zvuku porézním flexibilním médiem prezentovaný v práci [30] pro numerický výpočet

charakteristik netkaných vláknenných pavučin. Výsledky měly sloužit jako návod pro optimální návrh akustických elementů vyrobených z textilních materiálů.

Rozsáhlý výzkum N. Voronina [41-44] se zabýval stanovením empirických modelů šíření zvuku skrz vláknenné, porézní elastické i porézní materiály s tuhou konstrukcí. Studovány byly též akustické vlastnosti syntetických filmů, kterých se využívá v takových akustických systémech, kde hrozí uvolnění vláken nebo částic do okolního prostoru [45]. Empirické rovnice a modely byly získány pomocí srovnávací analýzy naměřených dat. Modely mohou být využity pro predikci hodnot akustické impedance a činitele zvukové pohltivosti materiálů se známými strukturními charakteristikami. V dalším článku [46] bylo předvedeno porovnání teoretického modelu stanoveného pro elastické porézní materiály v předchozí práci [44] s Biotovou teorií [47], která poskytla, vedle Zwikkera a Kostena, jeden z prvních teoretických modelů porézního materiálu. Tato teorie je postavena na základech výsledků získaných v práci [48] pro vzorek polykarboimidu s tloušťkou 0,023 m. Empirický model dosahuje velmi dobré shody s Biotovou teorií, zvláště ve frekvenční oblasti 2000 - 4000 Hz.

R. F. Lambert [49] vyvinul model určený k predikci akustické admitance a pohltivosti velmi porézními vrstvenými vláknennými materiály. Zkoumány byly porézní vzorky vyrobené z vláken Kevlaru 29. Měření potvrzují, že zvuková vlna dopadající kolmo na vlákna ve vrstveném materiálu způsobuje rezonanční efekt. Tento model však nebyl vhodný pro predikci pohltivosti směsi vláken a vzduchu v netkané vláknenné vrstvě.

C. W. Lou a kolektiv autorů [50] zjistili, že výkon činitele zvukové pohltivosti netkaných kompozit při středních a nízkých frekvencích lze zlepšit zvýšením jejich tloušťky. Touto úpravou by však také zásadně vzrostla váha a rozměry netkaného materiálu. Na základě tohoto zjištění byl v příspěvku [51] vyvíjen akustický materiál se sníženou hmotností. Studovány byly vlastnosti aktivovaných uhlíkových vláken a využití dvoustupňové pórovité struktury takových vláknenných netkaných vrstev jako velice výkonné a ekonomické akustické materiály. Z provedených měření je možné sledovat, že kompozity obsahující uhlíková vlákna mají výjimečnou schopnost pohltit kolmo dopadající zvukové vlny.

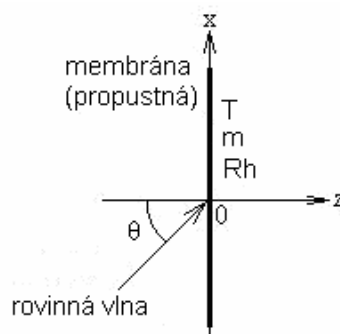
Autoři M. Garai a F. Pompoli [52] vyvinuli nový empirický model sloužící k predikci odporu proudění, akustické impedance a činitele zvukové pohltivosti PES

vláknenných materiálů. Vypočtené výsledky byly porovnávány s naměřenými hodnotami polyesterových vláknenných vzorků, které se lišili různou hustotou a průměrem vláken, při kolmém dopadu zvuku a jsou v dobré shodě s predikčním modelem.

### **2.5.2 Využití akustického rezonančního prvku v oblasti zvukové pohltivosti**

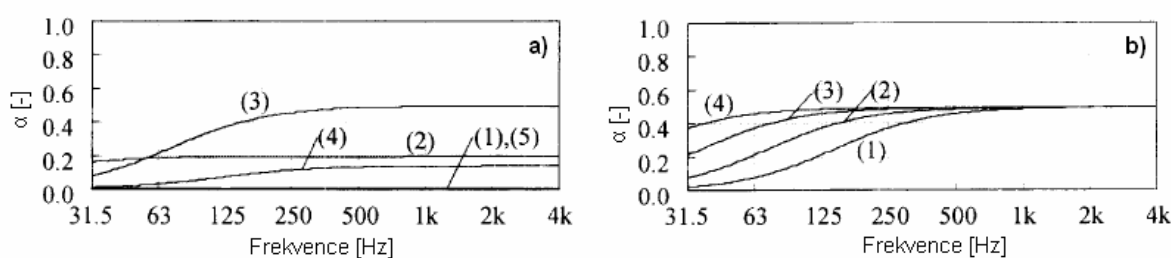
Tato kapitola pojednává o teoretickém i experimentálním rozboru zvukově pohltivých charakteristik akustických prvků využívající membrány. V současné době se membrány staly široce využívaným stavebním materiálem, častá je aplikace do stropů a střech, někdy i do interiérů. Membránové absorbéry jsou používány k pohlcování zvuku nízkých frekvencí. Za účelem zvýšení pohltivých schopností je membrána umístována v určité vzdálenosti rovnoběžně s tuhou zdí, vzniká tedy vzduchová mezera mezi zdí a membránou. M. Coates a M. Kerzkowski [53] ve své práci uvádí výhody tenkých, lehkých membrán, kterými je možno nahradit tradiční objemné a ekonomicky nevýhodné porézní absorbéry. Zabývají se jednotlivými parametry jako je např. velikost vzduchové mezery, tloušťka membránového absorbéru, jeho hustota, ohebnost a zejména pak odpor proti proudění vzduchu, díky kterému je možno posouvat maxima činitele zvukové pohltivosti k požadovaným frekvencím.

Studie uvedená v článku [54] podrobně zkoumá vlastnosti jednoduché propustné membrány. Objasněn je vliv parametrů membrány jako je plošná hmotnost a odpor proti proudění vzduchu. Studie vychází z teoretického řešení uvedeného v [55], které je příliš složité. Autoři se proto v tomto případě zaměřili pouze na kolmý dopad zvukových vln a zanedbali napětí. Propustná membrána, viz obr. 14, je charakterizována plošnou hmotností  $m$ , napětím  $T$  a odporem proti proudění vzduchu  $R$ . Membrána má tloušťku  $h$ , pro odpor proudění tedy platí  $Rh$ .



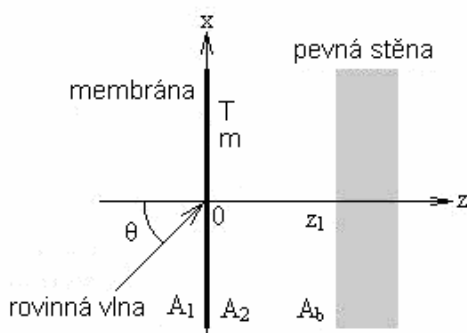
Obr. 14: Schématický náčrt geometrie propustné membrány.

Vliv odporu proti proudění na činitel zvukové pohltivosti  $\alpha$  se objevuje zejména při vyšších frekvencích, jak je vidět na obr. 15. Pro extrémní hodnoty je činitel  $\alpha$  nulový. Je tomu tak u extrémně nízkého odporu proti proudění, kdy veškerá energie projde přes membránu. V případě velice vysoké hodnoty  $Rh$  se membrána stává nepropustnou a veškerá zvuková energie je odražena. Optimální hodnota  $Rh$  se mění s frekvencí a plošnou hmotností membrány. Vliv plošné hmotnosti se objevuje zejména při nižších frekvencích. Pro vyšší hodnoty frekvencí je hodnota činitele  $\alpha$  téměř konstantní. Plošná hmotnost tedy ztrácí efekt při vyšších frekvencích a dominantní roli hraje pouze  $Rh$ , viz obr. 15. Dále bylo použito rovnocenné nahrazení akustického prvku elektrickým obvodem za účelem izolace podílu hmoty a podílu propustnosti na akustické vlastnosti.



Obr. 15: **a)** Vliv odporu proudění  $Rh$  na činitel zvukové pohltivosti propustné membrány:  $m = 1,0 \text{ kg.m}^{-2}$ ,  $Rh = 1(1), 10^2(2), 10^3(3), 10^4(4), \infty(5) \text{ MKSrayl}$ . **b)** Vliv plošné hmotnosti  $m$  na akustické vlastnosti propustné membrány:  $m = 0,5(1), 1,0(2), 2,0(3), 4,0(4) \text{ kg.m}^{-2}$ ,  $Rh = 10^3 \text{ MKSrayl}$ .

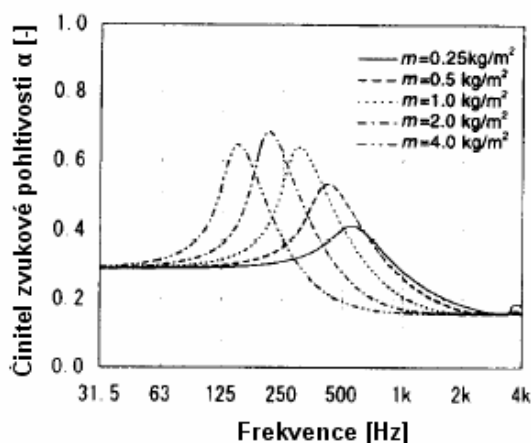
Ve studii [56] byl, menší úpravou řešení získaného v práci [57], vytvořen úplný tvar analytického řešení činitele zvukové pohltivosti nekonečné membrány se vzduchovou mezerou. S ohledem na vypočtené výsledky je pojednáváno o vlivu jednotlivých parametrů pohltivého prvku. Jako rozhodující je shledán příspěvek vzduchové mezery. Dále je uvedena metoda pro predikci frekvencí a hodnot maxim činitele zvukové pohltivosti pro dopad šikmých vln v případě použití membránového absorbéru. Uvažována je membrána nekonečných rozměrů, viz obr. 16, ležící v rovině  $x,y$ , umístěná rovnoběžně s pevnou zdí ve vzdálenosti  $z$ .



Obr. 16: Schématické znázornění akustického prvku tvořeného membránou, vzduchovou mezerou a pevnou stěnou.

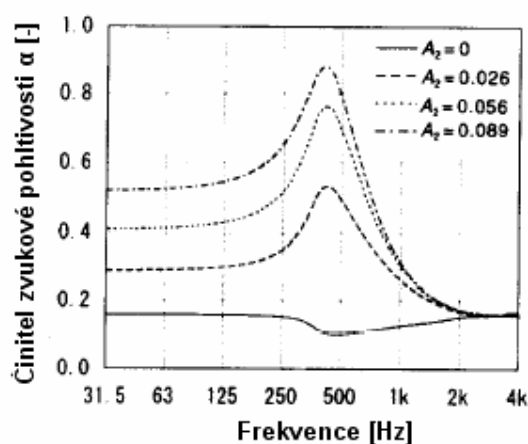
Membrána charakterizovaná plošnou hmotností  $m$  a napětím  $T$  se rozkmitá při dopadu rovinné vlny s úhlem dopadu  $\theta$ . Oba povrchy stran membrány, tedy strana zdrojová a zadní a povrch stěny je popsán specifickou akustickou admitancí  $A_1$ ,  $A_2$  a  $A_b$ . Činitel zvukové pohltivosti vyjadřuje množství absorbované energie včetně ztrát energie různých druhů, které mohou být způsobeny odlišnými mechanismy v rozdílných místech systému. Na obr. 17 jsou znázorněny vypočtené hodnoty činitele zvukové pohltivosti  $\alpha$  pro membrány s různou plošnou hmotností  $m$  a vzduchovou mezerou při dopadu průměrné rovinné vlny (průměr z úhlů  $0 - 78^\circ$ ). Frekvence maxima činitele  $\alpha$ , který je způsoben rezonancí systému, klesá s růstem plošné hmotnosti. Nejvyšší vrchol činitele  $\alpha$  je zaznamenán u vzorku s  $m = 2 \text{ kg.m}^{-2}$ .





Obr. 17: Vliv plošné hmotnosti membrány na činitel zvukové pohltivosti při dopadu rovinné vlny:  $m = 0,25; 0,5; 1,0; 2,0$  a  $4,0 \text{ kg.m}^{-2}$ ,  $T = 1,0 \text{ N/m}$ ,  $A_1 = A_2 = 0,026$ ,  $A_b = 0$ .

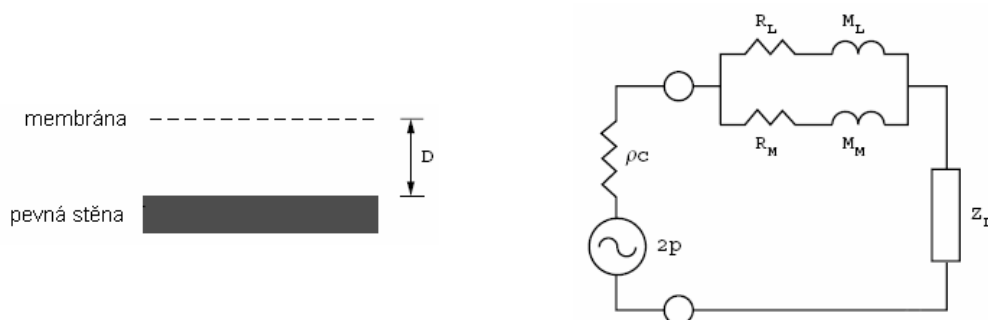
Zjištěno bylo, že zvuková pohltivost membrány oddělené vzduchovou mezerou od odrazivé stěny se skládá ze tří druhů ztrát energie. Jsou jimi ztráty způsobené povrchy obou stran membrány a způsobené povrchem odrazivé stěny. Na obr. 18 jsou předvedeny změny činitele  $\alpha$  se změnou akustické admitance povrchu zadní strany membrány  $A_2$ . Pohltivost roste v oblasti frekvencí pod 2kHz s rostoucí admitancí  $A_2$ , ale v oblasti frekvencí nad 2kHz není zřejmý žádný vliv admitance povrchu zadní strany. Lze tedy tvrdit, že při vyšších frekvencích je pohltivost ovlivněna zejména akustickou admitancí povrchu zdrojové strany membrány.



Obr. 18: Vliv specifické akustické admitance povrchu zadní strany membrány  $A_2$  na činitel zvukové pohltivosti:  $A_2 = 0,026; 0,056$  a  $0,089$ . Ostatní parametry jsou stejné jako na obr. 17.

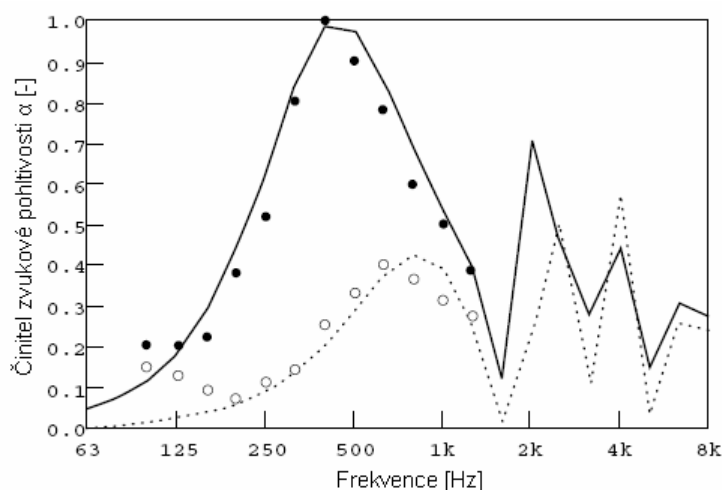
Dvojitý rezonanční prvek, tedy akustický prvek složený ze dvou membrán oddělených vzduchovou mezerou byl zkoumán ve studiích [58, 59]. V prvním z uvedených byla teoreticky analyzována dvouvrstvá membrána. Dále byla na základě provedených měření porovnávána shoda naměřených dat s teoretickým modelem. Proměřovány byly čtyři typy dvouvrstvých rezonančních prvků odlišující se plošnými hmotnostmi. První membrána umístěna ve směru dopadající zvukové vlny měla vždy zásadně menší (cca 10x) plošnou hmotnost oproti membráně druhé. Porovnáním výsledků lze tvrdit, že teoretický model je možné shledat jako vhodný. Dále byl zkoumán vliv jednotlivých parametrů na činitel zvukové pohltivosti, zejména vliv tloušťky vzduchové mezery, plošné hmotnosti obou membrán a jejich měrný odpor. Druhá uvedená studie byla zaměřena na téměř stejný problém, tedy dvouvrstvý rezonanční prvek a jeho teoretický model podložený experimentálním měřením. V tomto případě byla ale první membrána umístěná ve směru dopadající zvukové vlny propustná, charakterizovaná odporem proti proudění vzduchu. Sledován byl vliv stejných parametrů jako v předchozí studii, navíc byl zkoumán vliv odporu proudění vzduchu první membrány. I tento teoretický model se jeví být využitelný pro předpověď akustických vlastností dvojitých rezonančních prvků uvedeného typu. Bylo zjištěno, že pohltivost prvku zvyšuje propustnost membrány pokud je vhodně zvolen parametr odporu proudění vzduchu. Dále je možné sledovat růst zvukové pohltivosti při zvyšování hmotnosti první vrstvy a pokles zvukové pohltivosti snížením hmotnosti vrstvy druhé, v oblasti nízkých frekvencí. Charakteristika pohltivosti závisí při nižších frekvencích zejména na velikosti vzduchové mezery.

Základní myšlenkou, představenou v článku [60], je pohlížet na tkaninu či mikroporézní membránu jako na paralelní zapojení membrány a jejích otvorů. Představena byla metoda, díky níž je možno předpovědět pohltivost obdobných struktur. Pokud je akustická impedance děr mnohem větší než akustická impedance membrány, pak pohltivost celé struktury závisí zejména na charakteru membrány a naopak. Tkanina nebo mikroporézní membrána může být nahrazena elektrickým obvodem skládající se z paralelně zapojených odporových prvků nahrazující membránu a díry, dále ze zdroje akustického tlaku, který reprezentuje dopadající zvukovou vlnu na strukturu a z odporového prvku, který představuje vnitřní odpor vzduchu, viz obr. 19.



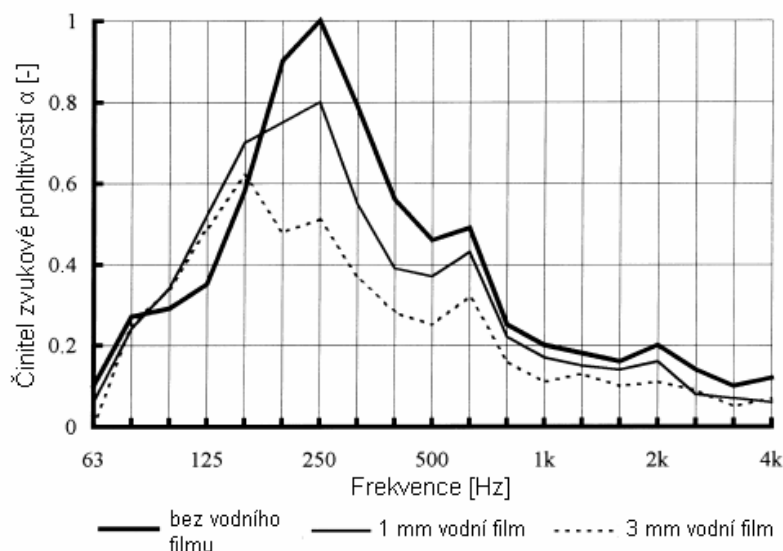
Obr. 19: Struktura jednovrstvé mikroperforované membrány či tkaniny a její nahrazení elektrickým obvodem.

Za účelem získání akustické impedance celého systému byla nejprve vypočtena akustická impedance jednotlivých elementů. Z té byl poté získán vztah pro vypočtení činitele zvukové pohltivosti. K potvrzení této teorie byly proměřeny 2 druhy tkaniny ze skleněných vláken a mikroperforovaná syntetická membrána. Měření probíhalo jak v dozvukové místnosti, tak pomocí impedanční trubice. Výsledky získané teoreticky jsou v dobré shodě s naměřenými hodnotami, viz obr. 20. Obdobným způsobem byla v této práci nahrazena elektrickým obvodem i struktura dvouvrstvá, která je efektivnější. Také v tomto případě dochází k velké shodě předpovězených výsledků s naměřenými hodnotami.



Obr. 20: Porovnání vypočteného a naměřeného činitele zvukové pohltivosti pro dvě tkaniny vyrobené ze skelných vláken s odlišnými parametry. Tkanina označená A: (—, vypočtené hodnoty; ●, naměřené hodnoty) a tkanina označená B (....., vypočtené hodnoty; ○, naměřené hodnoty), vzdálenost prvku od tuhé zdi  $D = 100\text{mm}$ .

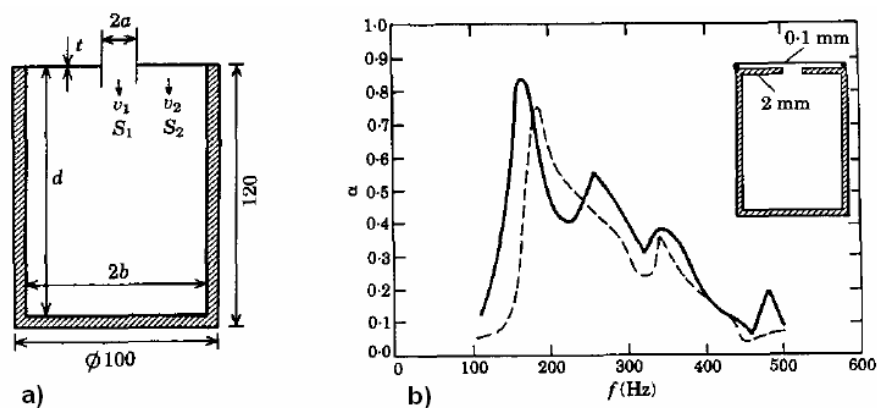
V příspěvku [61] byl ověřován vliv pórů na zvukovou pohltivost. Studovány byly dva typy absorbérů. Jeden o tloušťce 0,2 mm, druhý 0,8 mm. V provedeném experimentu byla membrána pokrývána vrstvičkou vody, která byla nanášena buď v podobě vodorovného filmu nebo svisle proudící vody. Výsledky výzkumu ukazují, že membrána pokrytá vrstvičkou vody nad 1mm výrazně snižuje činitel zvukové pohltivosti, viz obr. 21. Dále lze tvrdit, že svisle proudící voda má menší vliv na činitel zvukové pohltivosti než je tomu tak u vodorovného vodního filmu.



Obr. 21: Vliv stálého vodorovného vodního filmu na činitel  $\alpha$  u membrány tloušťky 0,2 mm.

Studie uvedená v [62] se zaměřuje na využití membrán k regulaci hlavních charakteristik místnosti. Výzkum probíhal s pomocí experimentálního modelu obdélníkové místnosti a následné početní analýzy. Ve článku [63] je převeden zvukový absorbér tvořen tenkými, poměrně tuhými kovovými či syntetickými membránami, kde je pohlcení vibrační energie způsobeno zejména třecími silami. Nové generaci akustického prvku je umožněna, spojením vibračního a tlumícího mechanismu, vysoká účinnost při středních a nižších frekvencích bez začlenění porézního materiálu. Voštinová konstrukce, neboli šestihranná struktura, v tomto případě tvoří lehký a stabilní rám akustického membránového prvku. Takový to absorbér je určen jak pro akustiku místností, tak i pro průmyslové aplikace, kde často dochází k znehodnocení povrchu prvku prachem nebo znečištění životního prostředí drsnými částicemi tlumícího materiálu.

Příspěvek [64] pojednává o efektu dvou-rezonančního systému obsaženém v jediném prvku na akustické vlastnosti. Zkoumaný absorbér se skládá z pevné voštinové konstrukce, na níž je připevněna děrovaná kovová membrána. Tento membránový systém vykazuje dva rezonační body, které lze přirovnávat k Helmholtzově a deskové rezonanci. Přidáním volně upevněné krycí membrány je zlepšeno akustické chování a prvek je hermeticky uzavřen. Výzkum sleduje vliv mnoha konstrukčních parametrů. Teoreticky i experimentálně je určen vliv obou typů rezonátorů. Získané poznatky jsou následně využity k zpracování početního modelu celého prvku, který může sloužit jako pomocný prostředek k navrhování membránových absorbérů. K experimentálnímu výzkumu byl použit model válcového tvaru, jehož stěny a dno je vyrobeno z 1 mm silného hliníkového plechu. Pomocí takového modelu byl zkoumán vliv rozměru  $d$ , vliv děrované membrány s průměrem díry  $2a$ , vliv přidané krycí membrány tloušťky  $t$  a změna způsobená jejich kombinací na činitel zvukové pohltivosti. Z uvedených výsledků je zřejmé, že takto složený akustický prvek přináší vyšší zvukové pohlcení, než je tomu u kombinovaného působení samotného Helmholtzova a deskového rezonátoru, viz obr. 22.



Obr. 22: **a)** Schéma válcového modelu, **b)** měření činitele zvukové pohltivosti Helmholtzova rezonátoru: ----, bez krycí membrány; —, s krycí membránou.

### 2.5.3 Teoretické a experimentální poznatky o kmitání membrán

I přesto, že bylo doposud publikováno mnoho teoretických studií o kmitání membrán, existuje jen velice málo experimentálních prací.

Základní kámen k provádění pokusů položil E. Chladini (1756-1827), který studoval kmitající desky a vyvinul (použitím písku, pilin a prachu k odhalení tvaru módů) experimentální metody pro provádění pokusů s vibrujícími membránami. Dalšími pokusy využívající napnutý pergamenový papír se zabýval M. Faraday. I Bourget časem představil své pokusy s membránami (cca 1860). Jako membránu používal namočený papír, který přilepil na dřevěnou konstrukci a poté ho sušil, aby dosáhl nezbytného napětí. Rayleigh [65] se zabýval některými Bourgetovými problémy. Byl jimi např. vznik trhlinek v membráně během sušení a s využitím Bourgetových membrán a Chladiniho metod byl schopen předvést dobré kvalitativní tvary módů a experimentálně potvrdil teoretické předpoklady. Bergmann studoval vibrace mýdlového filmu. CH. Jenkins dále představil pokusy využívající místní buzení pro výzkum lehce předpjaté membrány. Experimentální i teoretickou studií tvaru módů kmitů kruhové membrány, konečných i nekonečných rozměrů pomocí různých technik, se zabývali autoři uvedení v článku [66].

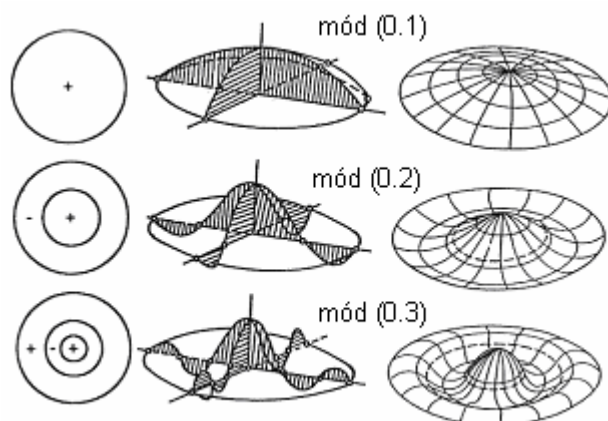
Kmitáním tenkých kruhových i čtvercových membrán a stanovením jejich vlastních kmitočtů se také zabýval Z. Škvor [14], viz odstavec 2.2.1.5. a R. Nový [7]. Vlastní kmitočty  $f_{mn}$  jako funkci módů  $m$  a  $n$  kruhové membrány na frekvenční ose je možno vyjádřit pomocí relativního kmitočtu  $\bar{f}_{mn}$  uvedeného v [7]:

$$f_{mn} = \frac{c_M \bar{f}_{mn}}{2 \pi R}, \quad (32)$$

kde:  $c_M$  – rychlost šíření signálu v membráně,

$R$  – poloměr membrány.

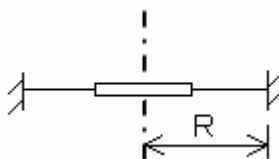
Na obr. 23 je znázorněno rozložení výchylek prvních tří symetrických módů kmitání kruhové membrány.



Obr. 23: Výchylky prvních tří módů  $(m,n)$  kruhové membrány, převzato z [14].

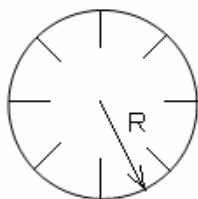
Stanovení přesného řešení kmitů kruhové membrány s nehomogenní hustotou bylo studováno v pracích [67, 68]. Vlastními kmity nehomogenní membrány, tedy membrány s proměnnou tloušťkou či materiálovou hustotou, se zabývá práce [69]. V mnoha dalších studiích je pojednáváno o různých modifikacích kmitající membrány upnuté v kruhovém rámu.

Na příklad v článku [70] bylo teoreticky studováno kmitání kruhové membrány, která byla připojena k pevnému středovému jádru, viz obr. 24. Sledován byl vliv takového tuhého středu na základní frekvenci membrány. Studie [71] navazuje na výše uvedenou práci, přináší další teoretické poznatky o frekvencích takové kmitající membrány a zabývá se porovnáním vypočtených frekvencí s daty získanými experimentálně.



Obr. 24: Schéma membrány poloměru  $R$  připojené k tuhé středové části.

Studie [72] je zaměřena na výzkum vlastní frekvence kruhové membrány s dodatečným hvězdicovitým porušením vycházející z vnějšího okraje, viz obr. 25. Z výsledků je zřejmé, že se základní frekvence roste se zvyšujícím se počtem rovnoměrně rozmístěných porušení  $M$  a délkou porušení  $b$ .



*Obr. 25: Schéma kruhové membrány s  $M$  rovnoměrně rozmístěných porušení.*

V článku [73] jsou popsány výsledky výzkumu vlastní frekvence kruhové membrány, která je v kontaktu s vodou. Je známo, že vlastní frekvence struktur ve vodě jsou menší než na vzduchu, a to díky vzrůstu celkové kinetické energie systému v důsledku přítomnosti vody. Autor se zabývá domněnkou, že se tvar módů v závislosti na přítomnosti vody nemění a zabývá se činitelem „zdánlivého přírůstku hmoty“, který je definovaný jako podíl kinetické energie vody a kruhové desky.



## 3 Experimentální část

### 3.1 Cíl

Jedním z cílů této práce byla studie frekvenční závislosti činitele zvukové pohltivosti nanovlákných membrán v závislosti na parametrech vzorků. Druhým cílem bylo prozkoumat mechanické vlastnosti, které mají významný vliv na zvukovou pohltivost. Ze vztahu pro stanovení vlastní frekvence kruhové membrány (25) byl vybrán modul pružnosti. Pro potřebu zjištění takovéto mechanické vlastnosti vzorku byla zvolena statická zkouška protržení, tzv. CBR test. Rezonanční frekvence kruhové membrány zjištěné studií grafů získaných měřením činitele zvukové pohltivosti byly porovnávány s vlastními frekvencemi vypočtenými pomocí modulu pružnosti. Měřené údaje byly zjišťovány při změnách parametrů rezonančního prvku.

### 3.2 Postup experimentu

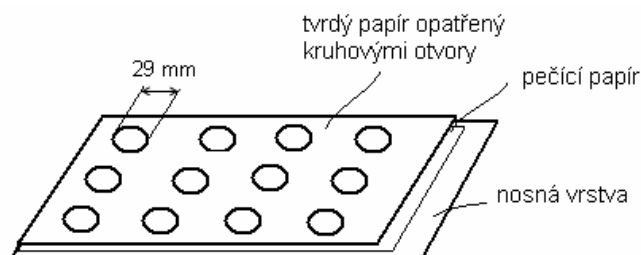
Za účelem dosažení výše uvedených cílů, byly v experimentu provedeny následující operace:

- 1) nanášením nanovlákné vrstvy o různých plošných hmotnostech vyrobena série vzorků,
- 2) proměřeny zvukově pohltivé vlastnosti vzorků pomocí Dvou mikrofónové impedanční trubice,
- 3) proměřena závislost síly na posunu čelistí jednotlivých vzorků pomocí zkušebního zařízení LabTest,
- 4) vyhodnocen vliv naměřených mechanických charakteristik na zvukovou pohltivost.

### 3.3 Výroba membrány

Příprava vzorků probíhala nanesením nanovlákné vrstvy na předem připravený arch tvrdého papíru opatřený kruhovými otvory o průměru 29 mm. Jako nosná vrstva byla použita netkaná textilie vyrobená metodou spunbond. Pro zajištění

snadného oddělení nanovláknenné vrstvy byla netkaná textilie z lícové strany opatřena pečícím papírem, viz obr. 26.



Obr. 26: Schéma přípravy materiálu pro nános nanovláken.

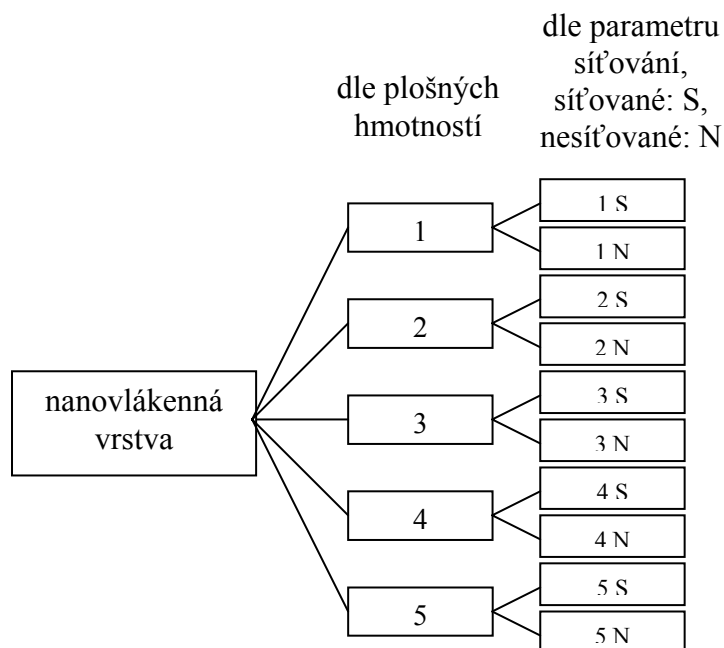
#### Nanovláknenná vrstva a její značení

Na připravený materiál, sestávající se z tvrdého papíru, pečícího papíru a netkané textilie, byla během další operace elektrostaticky nanesena nanovláknenná vrstva. Proces elektrostatického zvlákňování nanovláken probíhal na laboratorním zařízení Nanospider, z 12% procentního roztoku polyvinylalkoholu (viz příloha č. 1) za následujících podmínek. Zvlákňovací napětí bylo 50 kV, velikost proudu 0,2 mA, vzdálenost osy zvlákňovacího válečku od protielektrody 110 mm a rychlost otáčení zvlákňovacího válečku 2,5 ot./min. Oblast zařízení, kde probíhalo elektrostatického zvlákňování byla klimatizována. Klimatické podmínky v prostoru nanášení nanovláken:  $\rho = 26 \% \text{ RH}$ ,  $t = 20,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; v okolním prostoru:  $\rho = 45,2 \% \text{ RH}$ ,  $t = 20,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Plošná hmotnost vrstvy nanovláken byla přímo ovlivňována a regulována odtahovou rychlostí podkladového materiálu. Tímto způsobem byly vytvořeny tři různé plošné hmotnosti nanovláknenné vrstvy. Další dva typy vrstvy byly vyrobeny dvojnásobným a trojnásobným nanesením nanovláken při frekvenci odtahového zařízení 3 Hz, viz tabulka 4.

Označení vzorku	Četnost průchodu zvlákňovacím zařízením	Frekvence odtah. zařízení [Hz]	Rychlost odtahového zařízení [m/min]	Plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy [ $\text{g/m}^2$ ]
1	3 x	3Hz	0,054	26,324
2	2 x	3 Hz	0,054	17,711
3	1 x	3 Hz	0,054	8,811
4	1 x	6 Hz	0,108	4,031
5	1 x	12 Hz	0,216	2,137

Tab. 4: Značení a parametry nanášené nanovláknenné vrstvy na Nanospideru.

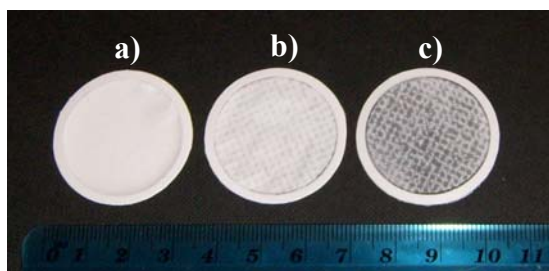
V dalším kroku byla polovina vzorků nanovlákněné vrstvy, zvlákněné na podkladový materiál vedena do horkovzdušné komory k částečnému procesu síťování za teploty 140°C po dobu 4,5 min. Před zavedením vzorků do horkovzdušné komory byl sejmут pečicí papír. Tímto krokem bylo získáno 10 vzorků, lišící se plošnou hmotností a parametrem síťování. Pro lepší orientaci ve značení vzorků bylo vytvořeno schéma (obr. 27).



Obr. 27: Rozdělení a značení vzorků dle plošných hmotností, dále dle splnění parametru síťování.

#### Tvorba vzorku

Vzorky pro měření byly vytvořeny vyseknutím soustředného kruhu pomocí raznice průměru 34 mm. Výsledně získané vzorky se sestávaly z papírového mezikruží, na němž byla napnuta nanovlákněná vrstva, viz obr. 28. Takto byly získány vzorky vhodné pro měření pomocí Dvou mikrofónové impedanční trubice a pro provedení statické zkoušky protržení.

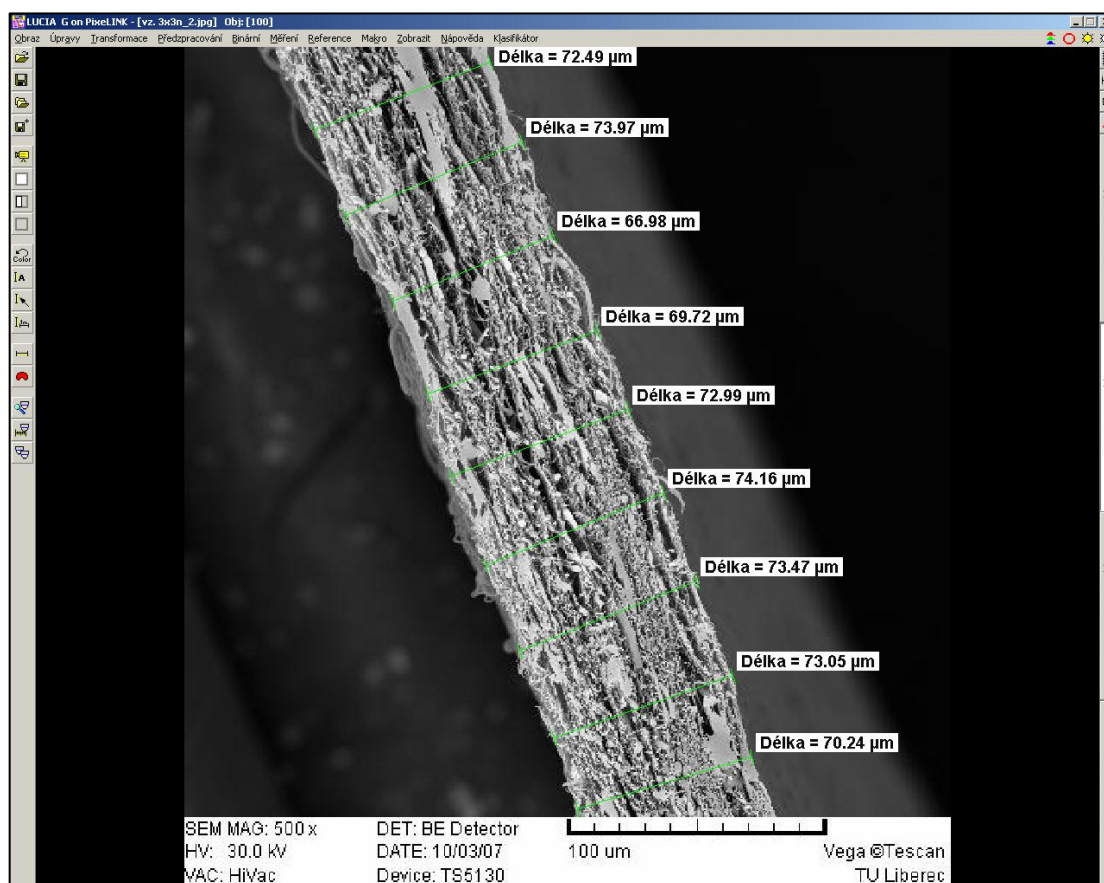


Obr. 28: Vzorky připravené pro měření; a) vzorek označený 1 - nejvyšší plošná hmotnost b) vzorek označený 3, c) vzorek označený 5 – nejnižší plošná hmotnost.

### 3.4 Zjištění tloušťky nanovlákněné vrstvy

Za účelem zjištění tloušťky nanovlákněné vrstvy byly pořízeny snímky příčných řezů vzorků pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu při zvětšení 500 – 4000x, viz příloha č. 2. Různé hodnoty zvětšení bylo nutno použít kvůli měnící se plošné hmotnosti vzorků. Pro každý typ vzorku bylo získáno 5 obrazů z různých míst vrstvy.

Softwarem Lucia G byly poté proměřovány tloušťky vrstvy v počtu 50 měření pro každý typ vzorku, viz obr. 29. Naměřené hodnoty byly exportovány do programu Excel, ve kterém byly vypočteny základní statistické charakteristiky, viz tabulka 5. Veškerá naměřená data a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 3.



Obr. 29: Obrazová analýza Lucia G, měření tloušťky nanovlákněné vrstvy.

Označení vzorku	Plošná hmotnost nanovlákněné vrstvy [g/m <sup>2</sup> ]	Průměrná hodnota tloušťky nanovlákněné vrstvy [μm]	Směrodatná odchylka [μm]	Variační koeficient [-]
1S	26,324	89,879	3,592	0,039
2S	17,711	61,417	13,63	0,222
3S	8,811	31,760	5,453	0,172
4S	4,031	12,492	1,484	0,119
5S	2,137	5,612	1,118	0,199
1N	26,324	83,955	8,887	0,106
2N	17,711	60,830	11,350	0,187
3N	8,811	25,663	4,926	0,192
4N	4,031	9,252	1,170	0,126
5N	2,137	5,534	0,899	0,163

*Tab. 5: Základní statistické charakteristiky naměřených hodnot tloušťky jednotlivých vzorků.*

Z tabulky 5 je zřejmé, že se tloušťka vrstvy zvyšuje se stoupající plošnou hmotností. Vzorky síťované vykazují vyšší tloušťku oproti vzorkům, které síťovány nebyly. Tento jev je způsobený smrštěním vrstvy při procesu síťování, tedy při působení teploty okolo 130 °C. Tloušťka nanovlákněného materiálu byla proměřována u vrstev, jež nebyly napnuty na papírovém mezikruží. U vzorků, které se sestávaly z nanovlákněné vrstvy napnuté na papírovém mezikruží nemohlo dojít ke smrštění vrstvy během síťování, tudíž byly v následující studii brány v úvahu pouze hodnoty tloušťky vrstev nesmrštěných, tedy nesíťovaných.

### **3.5 Měření činitele zvukové pohltivosti**

Činitel zvukové pohltivosti byl proměřen pomocí dvou mikrofonové impedanční trubice typu 4602 popsané v kapitole 2.2.1.6. Před každým měřením byl přístroj kalibrován.

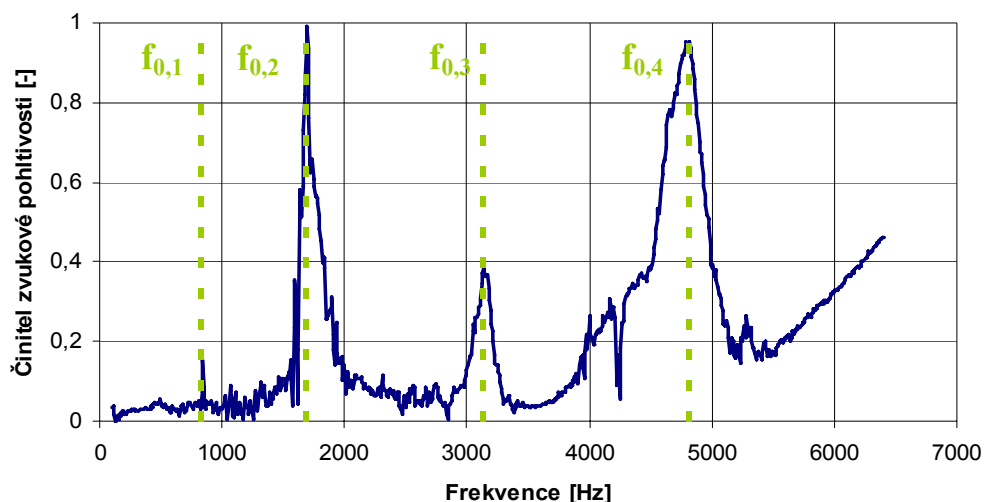
Akustická pohltivost byla proměřena u všech připravených vzorků, a to ve vzdálenosti 50 mm a 30 mm od odrazivé stěny. Vzdálenost od odrazivé stěny byla u absorpčních charakteristik jednotlivých vzorků označována příslušnou číslicí („50“ nebo „30“).

Za účelem částečné eliminace chyby měření, způsobené manipulací se vzorky, bylo proměřeno od každého vzorku pět kusů. Vzhledem k tomu, že pro každé měření bylo získáno několik set hodnot, byly výsledky zpracovány formou grafů. Hodnoty obdržené ze všech měření byly pomocí měřicího softwaru převedeny a graficky zpracovány v programu Excel. Z grafů je zřetelně vidět růst či pokles činitele zvukové pohltivosti v závislosti na měnící se frekvenci a naměřené výsledky je možno pomocí jednotlivých grafů velice přehledně porovnávat.

### 3.5.1 Vyhodnocení měření

Hodnoty získané měřením činitele zvukové pohltivosti byly z důvodu větší názornosti zpracovány do grafů. Pro zjištění vlastních (rezonančních) frekvencí byla provedena studie vrcholů, jež se vyskytují v naměřených grafech.

Příklad získávání daných údajů z grafů je znázorněn na následujícím obrázku (obr. 30), který přísluší síťovanému vzorku nanovlákněné vrstvy o plošné hmotnosti  $17,71 \text{ g.m}^{-2}$  ve vzdálenosti 50 mm od odrazivé stěny, tedy vzorku označeného 2S 50.



Obr. 30: Princip odečtu vlastních frekvencí z grafů pro vzorek označený 2S 50.

Vlastní frekvence kruhových membrán byly odečteny z grafů pro veškeré vzorky. Jednotlivé údaje byly zpracovány do tabulek (viz příloha č. 4). Ke všem hodnotám rezonančních frekvencí reálného systému byly také vypočteny hodnoty

teoretických rezonančních frekvencí, které jsou v tabulkách pro odlišení opatřeny závorkou.

***Odvození vztahů pro výpočet teoretických rezonančních frekvencí:***

Úpravou vztahu (25) je možno získat vztahy pro výpočet druhých  $f_{0,2}$ , třetích  $f_{0,3}$  a čtvrtých  $f_{0,4}$  rezonančních frekvencí.

Vlastní frekvenci membrány je možno vyjádřit ve tvaru:

$$f_{0,i} = \frac{a_{0,i} c_M}{2\pi R}, \quad (25)$$

kde:  $c_M$  - rychlost šířící se příčné vlny na membráně [ $\text{m.s}^{-1}$ ],

$R$  - poloměr membrány [m],

$a_{0,i}$  – koeficienty nutné pro stanovení rezonanční frekvence [-].

Poměr  $\frac{c_M}{2\pi R}$  je konstantní, neboť poloměr membrány ani rychlost šíření vlny membránou se nemění. Platí tedy:

$$\frac{f_{0,1}}{a_{0,1}} = \frac{f_{0,2}}{a_{0,2}} = \frac{f_{0,3}}{a_{0,3}} = \frac{f_{0,4}}{a_{0,4}}. \quad (33)$$

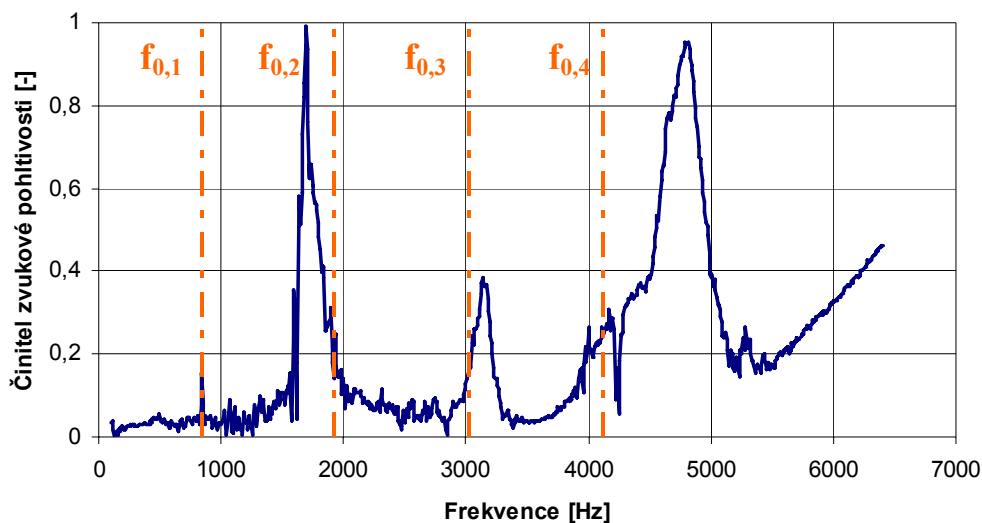
Hodnoty prvních rezonančních frekvencí  $f_{0,1}$  jsou odečteny z grafů. Hodnoty koeficientů  $a_{0,1}$  jsou použity z tabulky 3 dle [14]:

$$\frac{f_{0,1}}{a_{0,1}} = \frac{f_{0,2}}{a_{0,2}} \Rightarrow f_{0,2} = \frac{a_{0,2}}{a_{0,1}} f_{0,1} = \frac{5,5201}{2,4048} f_{0,1}, \quad (34)$$

$$\frac{f_{0,1}}{a_{0,1}} = \frac{f_{0,3}}{a_{0,3}} \Rightarrow f_{0,3} = \frac{a_{0,3}}{a_{0,1}} f_{0,1} = \frac{8,6537}{2,4048} f_{0,1}, \quad (35)$$

$$\frac{f_{0,1}}{a_{0,1}} = \frac{f_{0,4}}{a_{0,4}} \Rightarrow f_{0,4} = \frac{a_{0,4}}{a_{0,1}} f_{0,1} = \frac{11,7915}{2,4048} f_{0,1}. \quad (36)$$

Na obr. 31 jsou vyznačena místa, kde by se vyskytovaly vlastní frekvence v ideálním rezonančním systému. Hodnoty prvních rezonančních frekvencí  $f_{0,1}$  jsou odečteny z naměřených dat. Ostatní hodnoty rezonančních frekvencí jsou vypočteny podle vzorců (34), (35), (36).



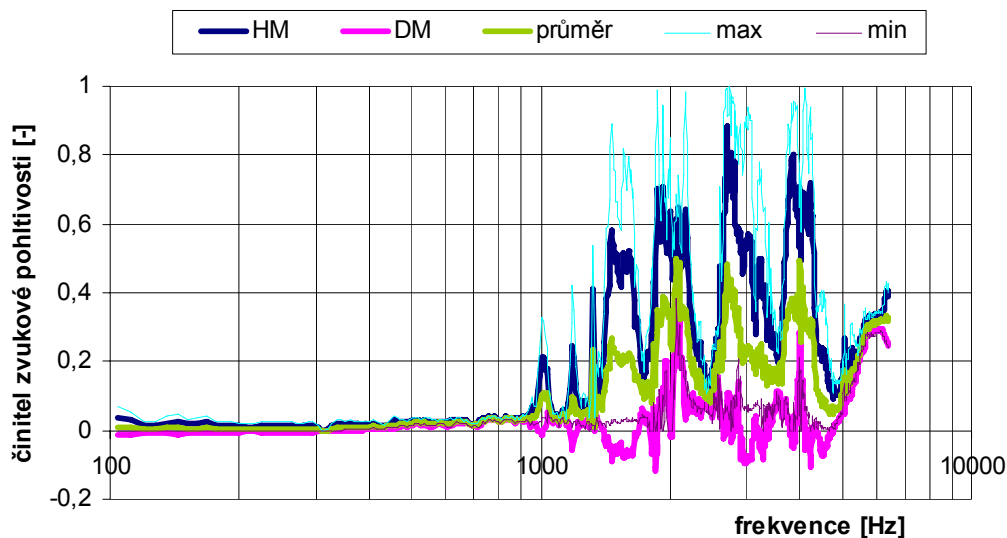
Obr. 31: Znázornění míst výskytu vlastních frekvencí systému v idealizovaném případě, vzorek označený 2S 50.

### 3.5.2 Statistické vyhodnocení

V této kapitole jsou pro názornost uvedena tři statistická zpracování dat, která reprezentují chybu měření danou nestejnoměrností materiálu, chybu měření danou uložením jednoho vzorku v měřicím zařízení a chybu přístroje. Přístroj byl před každým měřením kalibrován pro daný materiál. Soubory dat byly vyhodnoceny a graficky znázorněny pomocí programu Microsoft Excel. Pro názornost je v grafech uvedena průměrná hodnota, 95% interval spolehlivosti reprezentovaný horní a dolní mezí (HD, MD), maximální a minimální hodnota.

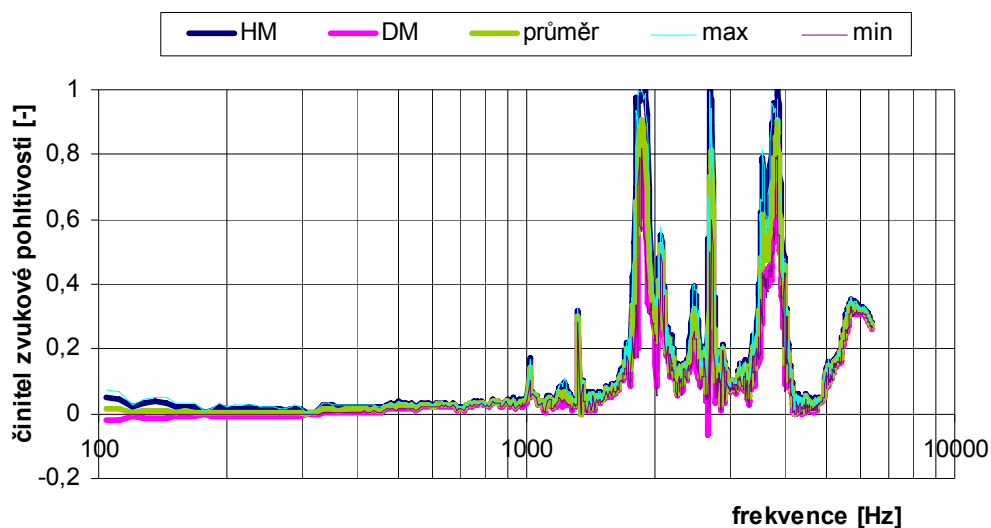
I. V tomto případě byl studován vliv nestejnoměrnosti materiálu na hodnoty činitele zvukové pohltivosti. Z jednoho typu materiálu bylo vybráno 6 vzorků a změřena jejich zvuková pohltivost. Jak je možno vidět na obr. 32 variabilita nanovlákněné membrány je značná. Tato variabilita je z velké části způsobena přípravou vzorku pro měření. Statistické vyhodnocení nebylo tedy nadále používáno. Do grafů nebyly vynášeny průměrné hodnoty, ale údaje naměřené pro stejný vzorek.





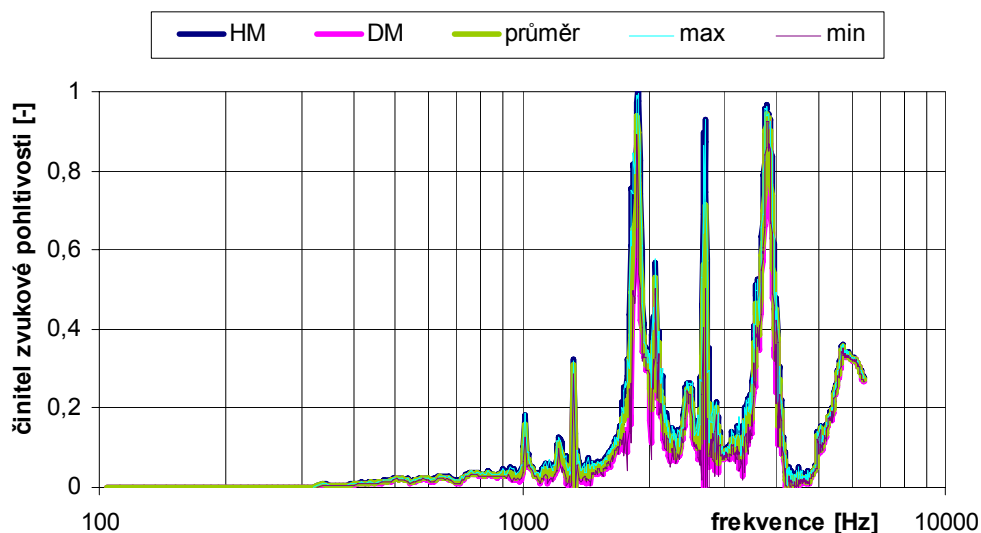
Obr. 32: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 5 vzorků nanovrstvy uchycené na papírovém mezikruží, označení vzorku 1S, měřeno ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny.

II. V tomto případě byla studována chyba měření způsobená umístěním vzorku v měřicím zařízení. Jediný vzorek byl vložen do měřicího zařízení a změřena jeho zvuková pohltivost. Vzorek byl z přístroje vyjmut a znovu nainstalován celkem 5krát. Jak je možno vidět na obr. 33, chyba měření není velká. Statistické vyhodnocení je z hledem k malému počtu dat pouze orientační.



Obr. 33: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 1 vzorku nanovrstvy uchycené na papírovém mezikruží s manipulací, označení vzorku 1S, měřeno ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny.

III. V tomto případě byla studována chyba měřícího zařízení. Jediný vzorek byl vložen do měřícího zařízení a 5krát změřena jeho zvuková pohltivost bez vyjmutí. Jak je možno vidět na obr. 34, chyba přístroje je nepatrná. Statistické vyhodnocení je vzhledem k malému počtu dat pouze orientační.

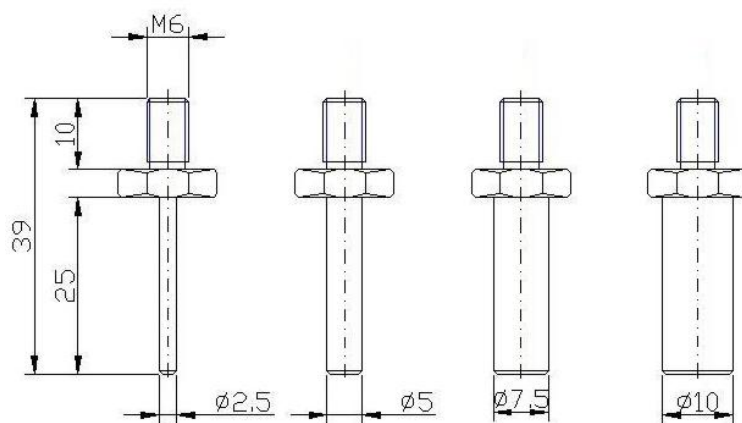


Obr. 34: Statistické zpracování dat činitele zvukové pohltivosti 1 vzorku nanovrstvy uchycené na papírovém mezikruží bez vyjímání, označení vzorku 1S, měřeno ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny.

### 3.6 Měření mechanických vlastností

Ke stanovení mechanických vlastností vhodných pro výpočet modulu pružnosti byla zvolena statická zkouška protržení, tzv. CBR test. Měření bylo provedeno na zkušebním stroji LabTest 4.050, viz kapitola 2.4.1. Použit byl siloměrný snímač 5 N a 4 typů indentorů, viz obr. 35. Jednotlivé průbojníky se odlišovaly průměrem, veškeré byly opatřeny plochým koncem. Základní rychlost posuvu průbojníku byla 150 mm/min. Pro indentor průměru 10 mm bylo vyzkoušeno použití vyšší rychlosti, a to 300 mm/min. Zaznamenávána byla síla a posun průbojníku.

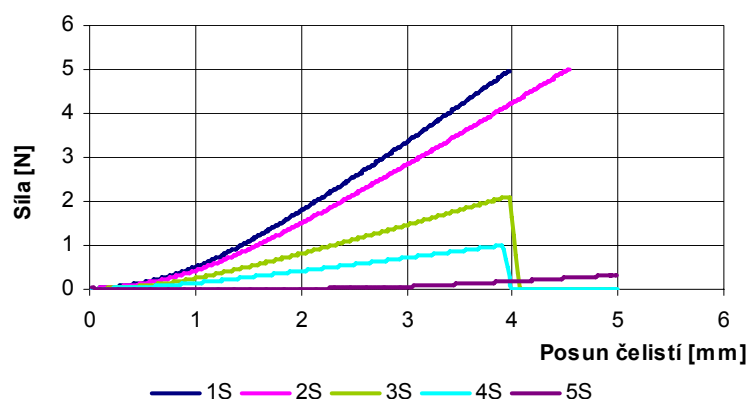
Tato zkouška byla vybrána proto, aby bylo možno z naměřených dat stanovit modul pružnosti  $E$  a následným výpočtem získat vlastní kmitočty kmitající membrány.



Obr. 35: Technická dokumentace použitých indentorů, uvedené rozměry jsou v mm.

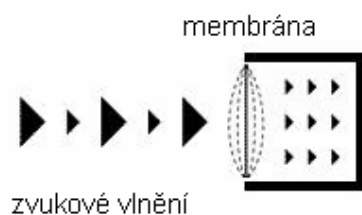
#### 3.6.1 Vyhodnocení měření

Výstupem statické zkoušky protržení (2.4) byl záznam závislosti působící síly na posunu průbojníku, viz obr. 36 a příloha č. 5.



Obr. 36: Závislost působící síly na posun průbojníku při použití indentoru o průměru 5 mm a síťovaných vzorků.

Při dopadu zvukového vlnění na akustickou rezonanční soustavu dochází k uvedení soustavy do vynucených kmitů (obr. 37), jejichž amplituda je maximální právě v případě rezonance. V tomto okamžiku též dochází k pohlcování zvuku.



Obr. 37: Schéma dopadu zvukového vlnění na membránový systém

Za účelem stanovení vlastní frekvence membrány dle vzorce (25) je zapotřebí nejprve stanovit rychlost příčné vlny šířící se na membráně  $c_M$ . Vzhledem k tomu, že fázová rychlost vlny šířící se médiem je dle [14]:

$$c_M = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \text{ [m.s}^{-1}\text{]}, \quad (37)$$

po dosazení do vztahu (25) dostáváme vztah pro vlastní frekvenci membrány:

$$f_{0,i} = \frac{a_{0,i} \sqrt{\frac{E}{\rho}}}{2\pi R} \text{ [Hz]}, \quad (38)$$

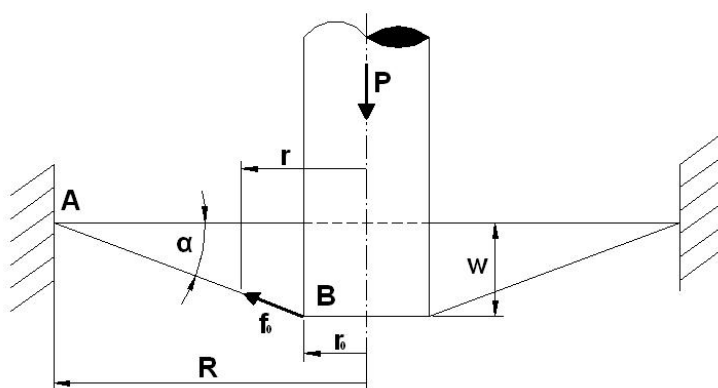
kde:  $E$  – modul pružnosti [Pa],

$\rho$  – měrná objemová hmotnost membrány [ $\text{kg.m}^{-3}$ ].

Aby bylo možno vypočítat vlastní frekvenci membrány dle vztahu (38) bylo nutno stanovit modul pružnosti z dat naměřených pomocí statické zkoušky protřetí.

***Odvození vztahů pro výpočet modulu pružnosti:***

Textilie sevřená v tuhém kruhovém rámu o poloměru  $R$  v mírně napnutém stavu je souměrně zatížena silou  $P$  tělesem válcového tvaru o poloměru  $r_0 < R$  s plochým koncem (obr. 39).



Obr. 39: Náčrt silového působení tělesa válcového tvaru na textilii upnutou v kruhovém rámu o poloměru  $R$ .

Posunutí středu kruhového vzorku textilie je označeno  $w$ . Úhel  $\alpha$  vymezuje kuželovou část textilie.

Z rovnováhy sil lze vyjádřit:

$$P = f_0 \sin \alpha \cdot 2\pi r_0 = f(R) \sin \alpha \cdot 2\pi R = f(r) \sin \alpha \cdot 2\pi r \quad [\text{N}], \quad (39)$$

kde:  $P$  – zatěžující síla  $[\text{N}]$ ,

$f$  – tahové namáhání  $[\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]$ ,

$R$  – poloměr kruhové membrány  $[\text{m}]$ ,

$r_0$  – poloměr průtláčníku  $[\text{m}]$ ,

$r$  – proměnná vzdálenost od osy souměrnosti v intervalu  $(0, R)$   $[\text{m}]$ .

Po úpravě tohoto vztahu je možno vyjádřit:

$$f(r) = \frac{P}{2\pi r \sin \alpha} = \frac{P \sqrt{(R - r_0)^2 + w^2}}{2\pi r w} \quad [\text{N} \cdot \text{m}^{-1}]. \quad (40)$$

V oblasti  $r \leq r_0$  je síla  $f(r) = f(r_0) = konst.$  To platí i pro deformaci  $\varepsilon_r = \varepsilon_r(r_0) = konst.$

Pro  $r > r_0$  se zmenšuje nejen  $f(r)$ , ale i  $\varepsilon_r$ .

Jednoosá radiální napjatost splňuje jednoduchý Hookeův zákon:

$$\sigma(r) = E\varepsilon(r) \text{ [Pa]}, \quad (41)$$

kde:  $\sigma$  – napětí [Pa],

$\varepsilon$  – poměrné délkové prodloužení [-],

$E$  – modul pružnosti [Pa].

Po úpravě vztahu (41) je možno vyjádřit:

$$\varepsilon_r(r) = \frac{\sigma(r)}{E} = \frac{f(r)}{hE} = \frac{P}{2\pi r w h E}, \quad (42)$$

kde:  $h$  – příčný rozměr textilie [m].

Označíme-li  $\varepsilon$  průměrnou deformaci poloměru textilie  $R$ , musí platit:

$$R(1 + \varepsilon) = r_0 + \sqrt{(R - r_0)^2 + w^2}. \quad (43)$$

Současně musí být splněno:

$$R(1 + \varepsilon) = \varepsilon_r(r_0) \cdot r_0 + \int_{r_0}^R \varepsilon_r(r) dr \frac{1}{\cos \alpha}. \quad (44)$$

Po úpravě vztahů (42, 43, 44) platí:

$$r_0 + \sqrt{(R - r_0)^2 + w^2} = \frac{P\sqrt{(R - r_0)^2 + w^2}}{2\pi h E w} \left[ \frac{1}{r_0} r_0 + \int_{r_0}^R \frac{dr}{r} \frac{\sqrt{(R - r_0)^2 + w^2}}{R - r_0} \right], \quad (45)$$

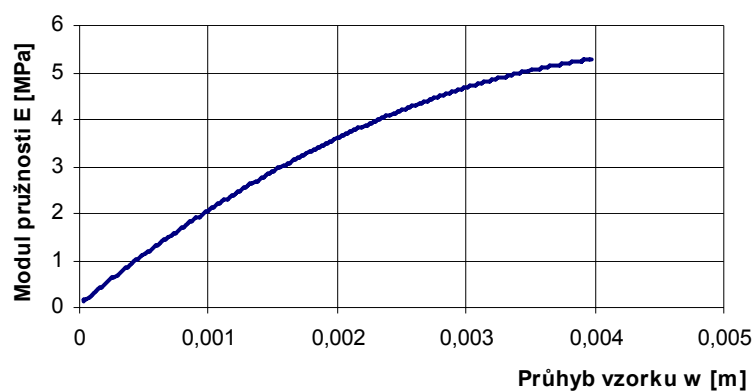
$$\sqrt{(R - r_0)^2 + w^2} = \frac{P\sqrt{(R - r_0)^2 + w^2}}{2\pi h E w} \left( 1 + \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \frac{\sqrt{(R - r_0)^2 + w^2}}{R - r_0} \right). \quad (46)$$

Modul pružnosti  $E$  je roven:

$$E = \frac{P\sqrt{(R - r_0)^2 + w^2} \left( R - r_0 + \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \sqrt{(R - r_0)^2 + w^2} \right)}{2\pi h w (R - r_0) \left( r_0 + \sqrt{(R - r_0)^2 + w^2} \right)}. \quad (47)$$

Pomocí tohoto vztahu (47) byl pro jednotlivé vzorky, lišící se plošnou hmotností a parametrem síťování a jednotlivá protlačovaná tělesa, lišící se poloměrem  $r_0$  (1,25; 2,5; 3,75; 5 mm) početně určen modul pružnosti. Hodnota  $R$ , tedy poloměr kruhové membrány je neměnný a jeho hodnota je 14,5 mm.

Bylo zjištěno, že modul pružnosti  $E$  není konstantní a je závislý na průhybu  $w$ . Tento jev je způsoben změnou struktury vzorku již při velmi malém zatěžování, viz obr. 40 a příloha č. 6. Pro další vyhodnocení bylo pracováno s konstantní hodnotou průhybu vzorku  $w$ , který byl zvolen ve čtyřech bodech, a to v: 1, 2, 3 a 4 mm.



Obr. 40: Závislost modulu pružnosti  $E$  na průhybu vzorku  $w$  pro vzorek 1S při použití indentoru průměru 5 mm.

Hodnoty získané při posunu průbojníku vyšší rychlostí (300 mm/min) nebyly dále vyhodnocovány a to z důvodu nízkého počtu dat, který byl způsoben vyšší posunovací rychlostí indentoru.

## 4 Výsledky a diskuse

### 4.1 *Vliv plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti*

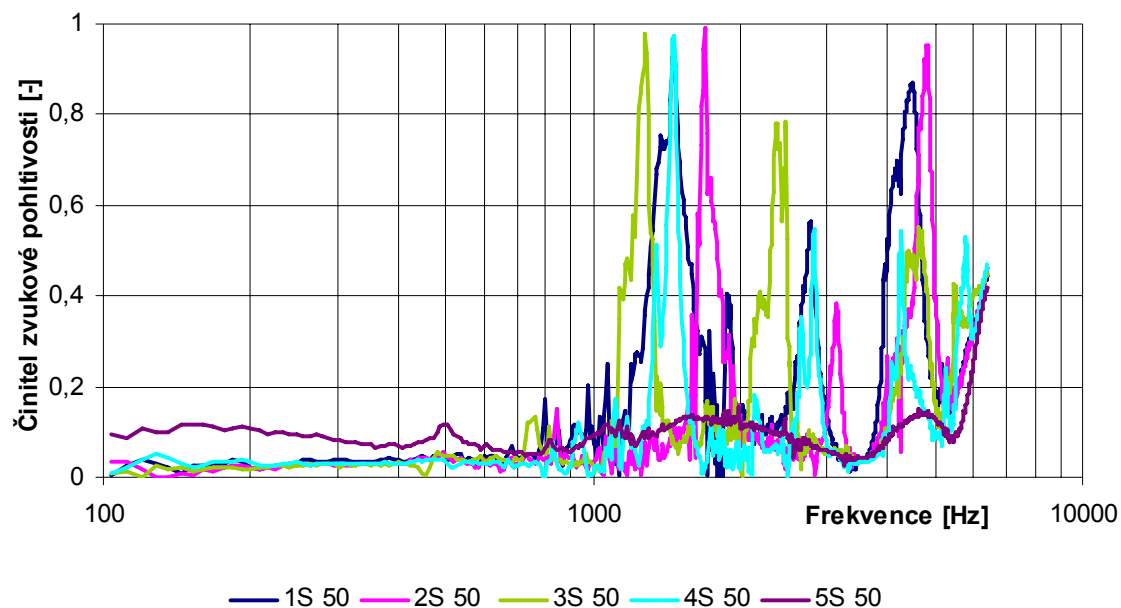
Tato kapitola diskutuje vliv plošné hmotnosti nanovlákněné membrány na velikost činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku. Z následujících grafů naměřených při vzdálenosti od odrazivé stěny 50 mm (viz obr. 41 a obr. 42) je zřetelně patrný vliv plošné hmotnosti nanovlákněného materiálu na činitel zvukové pohltivosti.

V případě síťovaných vzorků (obrázky 41) vykazuje nejvyšší pohltivost (téměř rovnu 1) vzorek označený 2S, tedy vzorek s druhou nejvyšší plošnou hmotností ( $17,71 \text{ g.m}^{-2}$ ). S klesající plošnou hmotností lze dále sledovat i pokles činitele zvukové pohltivosti. Vzorek s nejmenší plošnou hmotností ( $2,14 \text{ g.m}^{-2}$ ) dosahuje výrazně nejnižší pohltivosti, činitel  $\alpha$  nepřekročí hodnotu 0,2. Rezonanční frekvence se se zvyšující plošnou hmotností posouvá k nižším frekvencím, ale jen v případě jednoduché výroby vrstev (vzorky označené: 3S, 4S, 5S). U vzorků vytvořených vícenásobným nanášením vrstvy (vzorky označené: 1S, 2S) lze sledovat stejnou závislost, tato závislost ovšem nekoresponduje s ostatními vzorky (vzorky: 3S, 4S, 5S). Tento jev je zřejmě způsoben větší objemností materiálu, přičemž je pohltivost dosaženo třením vzduchu ve struktuře. Vzorky vyrobené vícenásobným nanášením nejsou tak tenké, nekmitají tolik a je možno sledovat pohlcování při vyšších frekvencích.

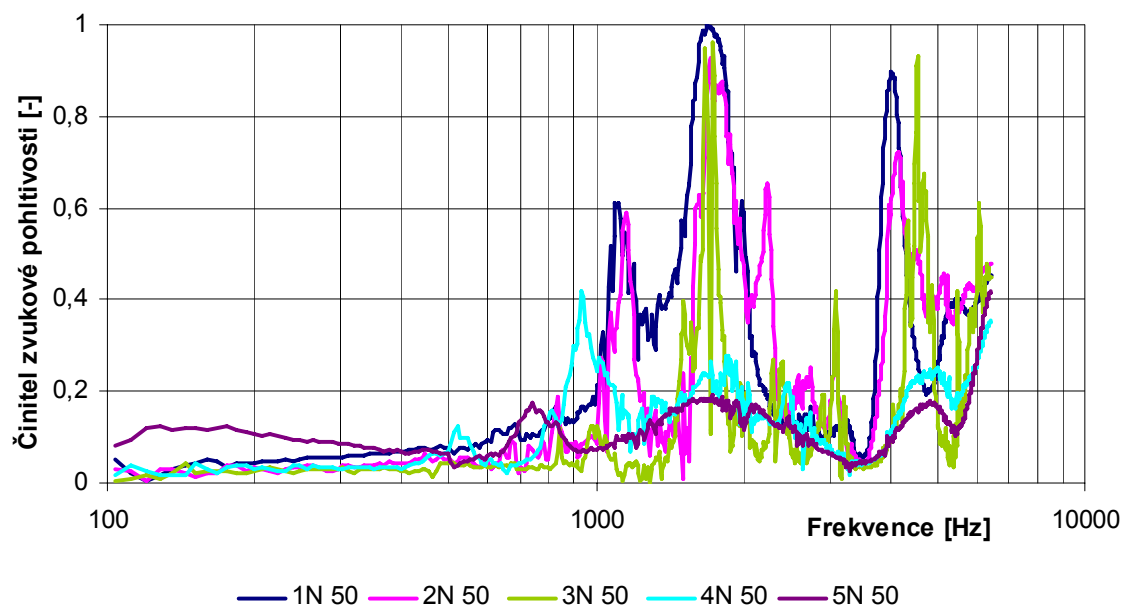
U vzorků nesíťovaných (obrázky 42) vykazuje nejvyšší pohltivost vzorek označený 1N ( $26,32 \text{ g.m}^{-2}$ ). Vzorky označené 2N, 3N dosahují obdobných hodnot činitele zvukové pohltivosti, přičemž při dalším snižování plošné hmotnosti lze vidět výrazný pokles pohlcování zvuku. I v tomto případě je možno sledovat rezonanční frekvence, které se posouvají se zvyšujícími plošnými hmotnostmi k nižším hodnotám. I zde je zřejmý rozdíl mezi vrstvami vyrobenými klasicky a vrstvami vyrobenými vícenásobným nanášením.

Grafické znázornění vlivu plošných hmotností nanovlákněné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti měřené při vzdálenosti odrazivé stěny 30 mm jsou uvedeny v příloze č. 7.





Obr. 41: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy (26,32; 17,71; 8,81; 4,03; 2,14  $\text{g.m}^{-2}$ ) pro vzorky síťované, vzdálenost odrazivé stěny 50 mm.



Obr. 42: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy (26,32; 17,71; 8,81; 4,03; 2,14  $\text{g.m}^{-2}$ ) pro vzorky nesíťované, vzdálenost odrazivé stěny 50 mm.

## **4.2 Vliv parametru síťování nanovláknenné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti**

Tato kapitola diskutuje vliv parametru síťování nanovláknenné membrány na velikost činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku. Z následujících grafů naměřených při vzdálenosti od odrazivé stěny 50 mm (viz obr. 43 a obr. 44) je zřetelně patrný vliv parametru síťování nanovláknenného materiálu na činitel zvukové pohltivosti.

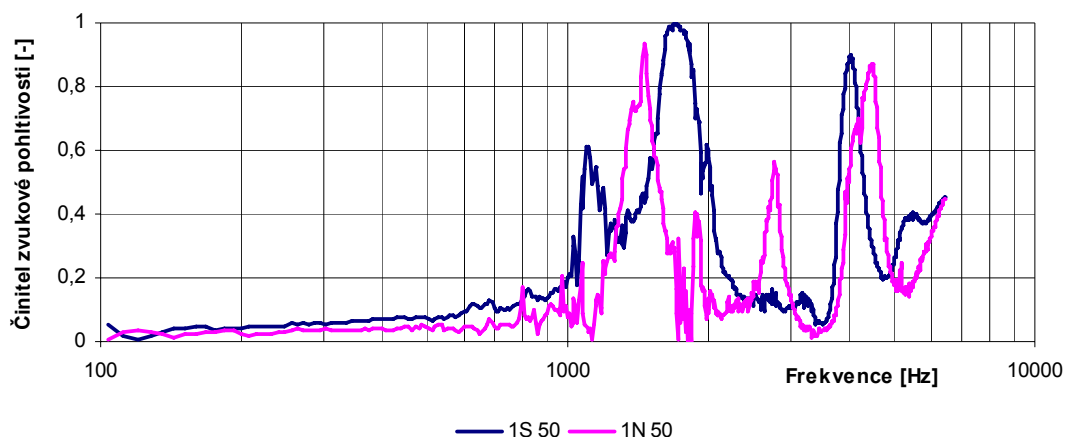
Z grafů lze vidět rozdílné hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro jednotlivé síťované či nesíťované vzorky. Je zřejmé, že vzorky jež byly při výrobě síťovány vykazují vyšší pohlcování zvuku (viz obr. 43 a obr. 44).

Hodnoty činitele  $\alpha$  jsou u vzorků síťovaných vyšší, než je tomu u vzorků nesíťovaných. Rozdíl mezi hodnotami pohltivosti porovnávaných vzorků však není markantní, jak je možno vidět u vzorků označených 1 (obr. 43), 2 a 3 (příloha č. 8).

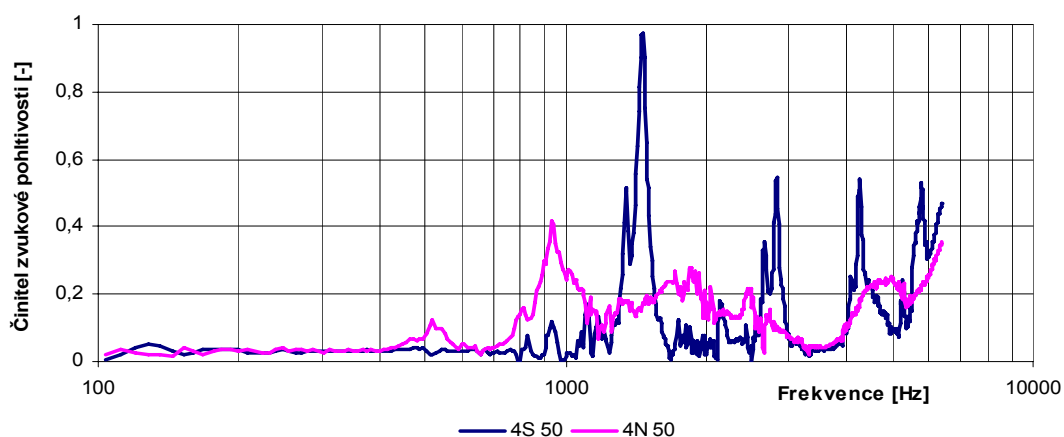
Velké rozdíly v pohlcování při změně parametru síťování je možno sledovat u vzorků s druhou nejnížší plošnou hmotností (obr. 44). Zde je zřejmé, že nanovláknenná vrstva, jež byla při výrobě síťována vykazuje podstatně vyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti, než vrstva nesíťovaná.

Odlišné chování je možno pozorovat pouze u vzorků s nejnížší plošnou hmotností. Činitel  $\alpha$  má u vzorků síťovaných i nesíťovaných obdobný průběh, ovšem nesíťovaný materiál dosahuje dokonce vyšších hodnot pohltivosti (viz obr. 45).

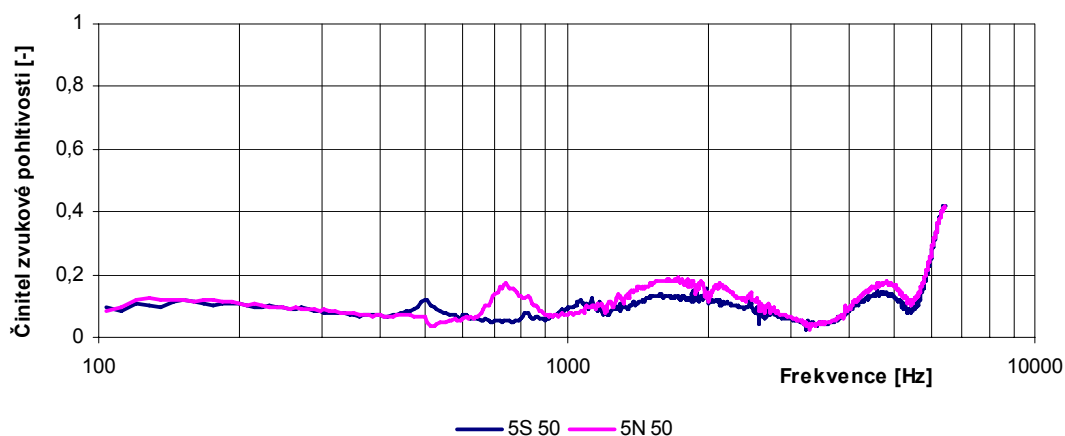
Z grafů je tedy patrné, že se rozdíl hodnot činitele zvukové pohltivosti související s parametrem síťování měřených vzorků objevuje u všech testovaných materiálů odlišných plošných hmotností, přičemž vzorky síťované dosahují vyšších hodnot činitele  $\alpha$ . Výjimku tvoří pouze nanovláknenná membrána s nejnížší plošnou hmotností  $2,14 \text{ g.m}^{-2}$ .



Obr. 43: Vliv parametru síťování nanovláknenné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro vzorek plošné hmotnosti  $26,32 \text{ g.m}^{-2}$ , měřeno 50 mm od odrazivé stěny.



Obr. 44: Vliv parametru síťování nanovláknenné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro vzorek plošné hmotnosti  $4,03 \text{ g.m}^{-2}$ , měřeno 50 mm od odrazivé stěny.



Obr. 45: Vliv parametru síťování nanovláknenné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro vzorek plošné hmotnosti  $2,14 \text{ g.m}^{-2}$ , měřeno 50 mm od odrazivé stěny.

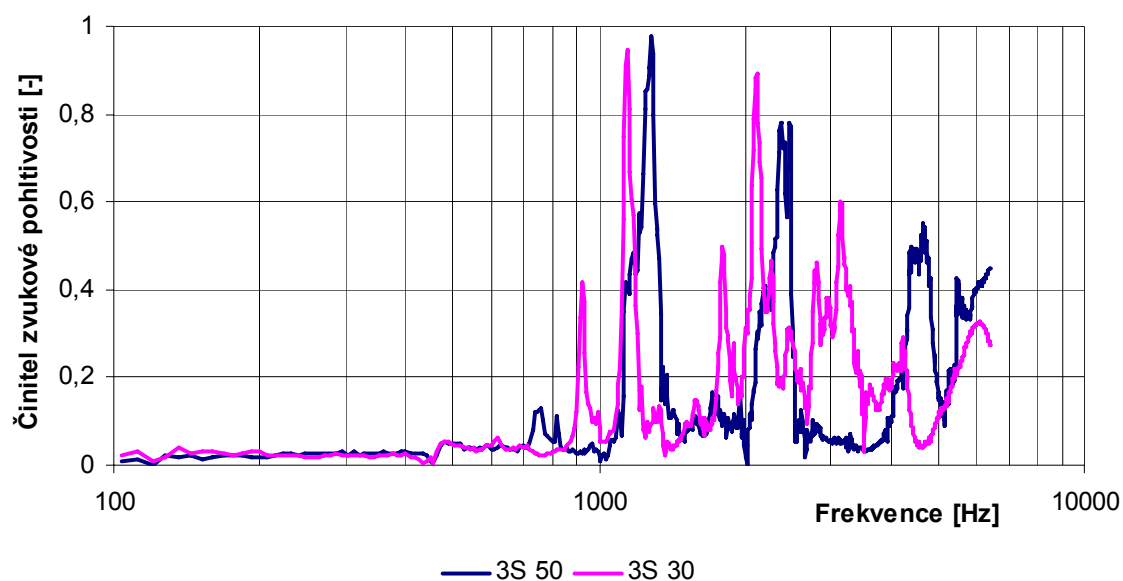
### ***4.3 Vliv vzdálenosti prvku od odrazivé stěny na hodnoty činitele zvukové pohltivosti***

Tato kapitola diskutuje vliv vzdálenosti nanovlákněné membrány od odrazivé stěny na velikost činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku. Pohltivé charakteristiky vzorků byly proměřovány při dvou různých vzdálenostech odrazivé stěny, a to 30 a 50 mm. V jednom grafu jsou vždy soustředěny průběhy naměřené závislosti pro vzorky se stejnou plošnou hmotností ve dvou různých vzdálenostech od odrazivé stěny. Z následujících grafů je zřetelně patrný vliv vzdálenosti nanovlákněného materiálu od odrazivé stěny na činitel zvukové pohltivosti (obr. 46 a 47)

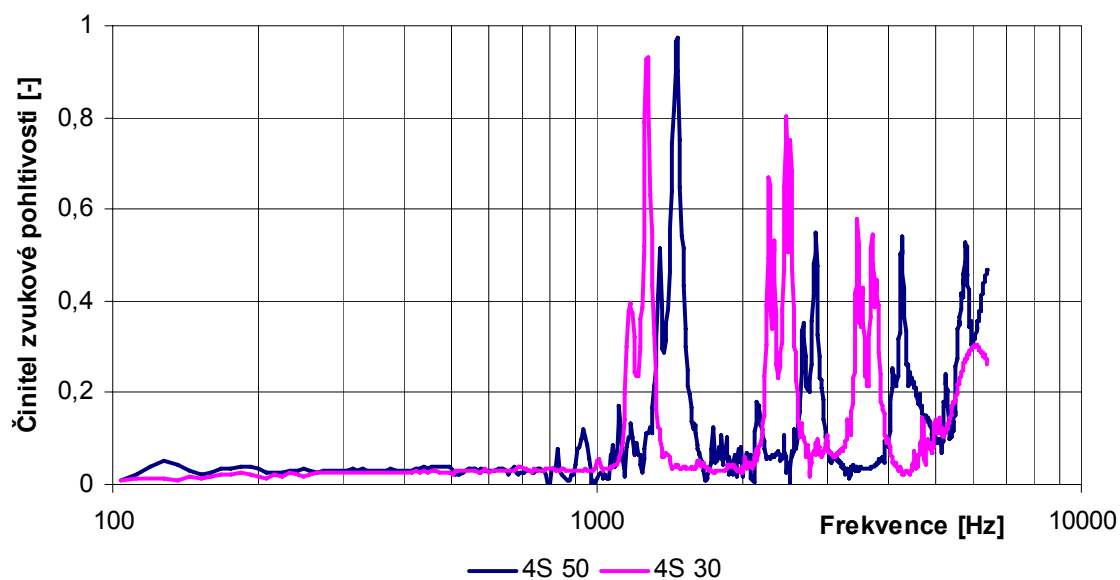
Jak lze vidět na obrázcích, hodnota činitele zvukové pohltivosti se mění v závislosti na vzdálenosti prvku od odrazivé stěny. Průběhy křivek v jednom grafu se téměř kopírují. S větší vzdáleností od odrazivé stěny dosahují první rezonanční maxima vyšších hodnot činitele  $\alpha$ , zatímco vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti při studii dalších rezonančních maxim dosahují vzorky umístěné blíže k odrazivé stěně.

Lze také sledovat jev, kdy při použití menší vzdálenosti od odrazivé stěny dochází k růstu křivky již při nižších frekvencí narozdíl od průběhů pohltivosti prvků umístěných 50 mm od odrazivé stěny. Výjimku tvoří pouze průběh závislosti u vzorků s nejnižší plošnou hmotností, kde nejsou jasná rezonanční maxima.

Výše uvedené charakteristiky potvrzují i grafické závislosti činitele zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci pro vzorky dalších plošných hmotností, síťovaných i nesíťovaných, viz příloha č. 9.



Obr. 46: Vliv vzdálenosti odrazivé stěny od nanovlákněné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro síťovaný vzorek o plošné hmotnosti  $8,81 \text{ g.m}^{-2}$ .



Obr. 47: Vliv vzdálenosti odrazivé stěny od nanovlákněné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro síťovaný vzorek o plošné hmotnosti  $4,03 \text{ g.m}^{-2}$ .

#### ***4.4 Vliv plošné hmotnosti vzorku na jeho rezonanční frekvenci (stanovené pomocí měření činitele zvukové pohltivosti)***

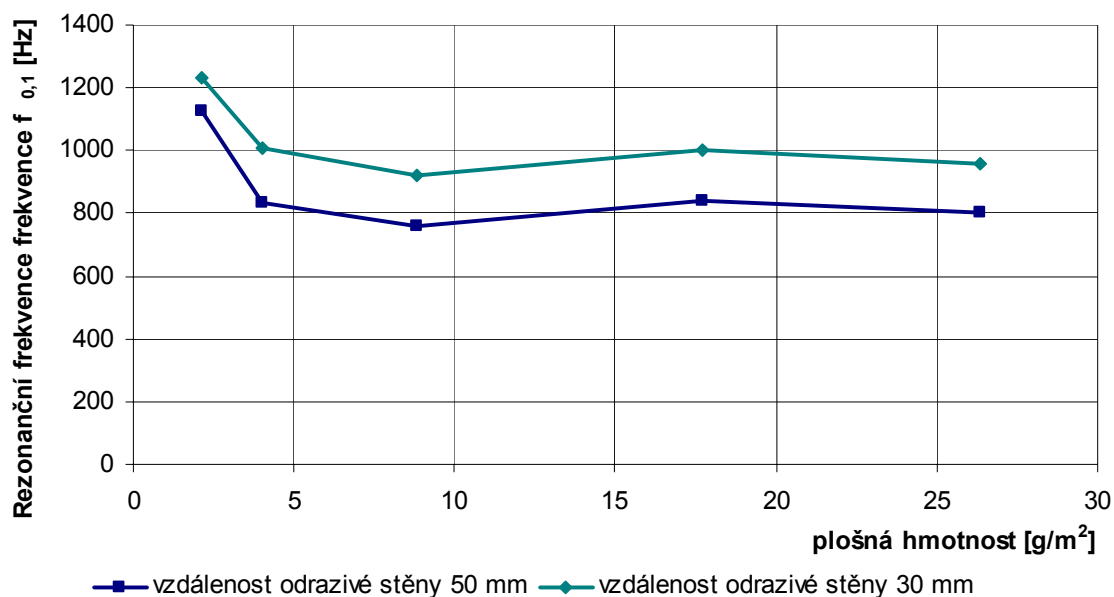
Tato kapitola diskutuje vliv plošné hmotnosti nanovlákněné membrány na její vlastní (rezonanční) frekvenci stanovenou pomocí měření činitele zvukové pohltivosti. Pro zjištění vlastních frekvencí byla provedena studie vrcholů (viz kapitola 3.5.1), jež se vyskytují v naměřených grafech. Veškeré odečtené rezonanční frekvence reálného systému jsou uvedeny v příloze č. 4.

Pohltivé charakteristiky vzorků byly proměřovány při dvou různých vzdálenostech odrazivé stěny, a to 30 a 50 mm a odlišném splnění parametru síťování. V jednotlivých grafech jsou porovnávány závislosti vzorků totožných, tedy síťovaných či nesíťovaných se změnou vzdálenosti od odrazivé stěny.

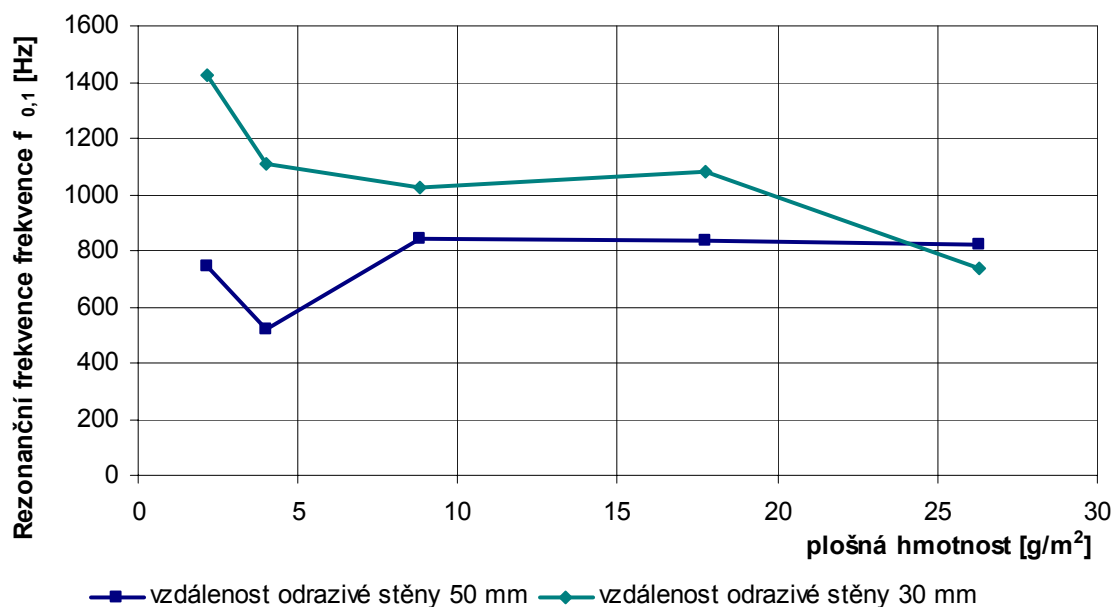
Jak je vidět na obr. 48, který prezentuje závislost rezonanční frekvence membrány na plošné hmotnosti pro vzorky síťované, v grafech můžeme vidět dvě skupiny vzorků, jež se chovají obdobně. První skupina (plošné hmotnosti 2,14; 4,03 a 8,81 g.m<sup>-2</sup>) je tvořena vzorky vyrobenými klasickým způsobem, zatímco druhá skupina vzorků (plošné hmotnosti: 17,71 a 26,32 g.m<sup>-2</sup>) je vytvořena vícenásobným nanášením vrstvy. V obou skupinách lze sledovat stejný trend, kdy rezonanční frekvence membrány klesá se stoupající plošnou hmotností vzorku, avšak tyto dvě skupiny spolu nekorespondují. Tento jev je způsoben odlišnou strukturou a následně i odlišným pohlcováním zvuku vzorků klasických a vícevrstvých.

Na obr. 49 je znázorněna závislost rezonanční frekvence membrány na plošné hmotnosti pro vzorky nesíťované. U vzorků měřených při vzdálenosti 50 mm není možné sledovat stejný trend jako u vzorků ostatních. Zvuková pohltivost vzorků byla proměřována nejprve ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny a poté byl vzduchový polštář zvětšen na 50 mm. Při prvním měření pohltivosti (měření při vzdálenosti odrazivé stěny 30 mm) byla zřejmě struktura nesíťované vrstvy deformována a proto vzorky nevykazují stejný trend při následném měření ve vzdálenosti 50 mm.

Lze tedy říci, že byl potvrzen teoretický předpoklad (viz [14]), který předpovídá pokles rezonanční frekvence kruhové membrány při vzrůstu plošné hmotnosti vrstvy.



Obr. 48: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na plošné hmotnosti vzorků síťovaných při změně vzdálenosti odrazivé stěny. Rezonanční frekvence stanovena pomocí měření činitele zvukové pohltivosti.



Obr. 49: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na plošné hmotnosti vzorků síťovaných při změně vzdálenosti odrazivé stěny. Rezonanční frekvence stanovena pomocí měření činitele zvukové pohltivosti.

#### **4.5 Vliv plošné hmotnosti vzorku na jeho rezonanční frekvenci (vypočtené pomocí modulu pružnosti)**

Tato kapitola diskutuje vliv plošné hmotnosti nanovlákněné membrány na její vlastní (rezonanční) frekvenci vypočtenou pomocí modulu pružnosti, který byl stanoven z naměřených dat statické zkoušky protržení (viz kapitola 3.6.1). Jak již bylo uvedeno výše, modul pružnosti vzorků není konstantní a je závislý na průhybu membrány  $w$ . Tento jev je způsoben změnou struktury vzorku již při velmi malém zatížení. Pro další vyhodnocení bylo pracováno s konstantní hodnotou průhybu  $w$ , který byl zvolen ve čtyřech bodech, a to v: 1, 2, 3 a 4 mm.

V jednotlivých grafech jsou porovnávány závislosti vzorků totožných, tedy síťovaných či nesíťovaných a mění se průměr protlačovaného tělesa (2,5; 5; 7,5; 10 mm). Pro názorné porovnání vlivu plošné hmotnosti byly vybrány závislosti při hodnotě průhybu  $w = 3$  mm, protože této hodnoty průhybu dosahovaly téměř všechny vzorky odlišných plošných hmotností. Rychlost protlačování je 150 mm/min.

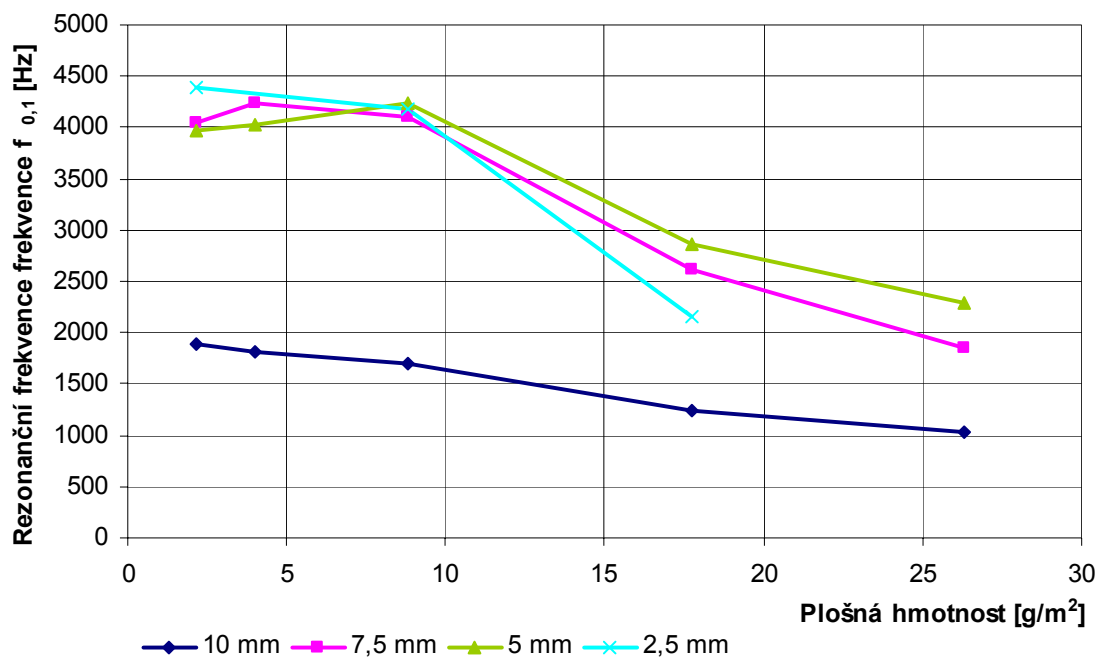
Jak je vidět na obr. 50, kde je zobrazena závislost vzorků nesíťovaných, můžeme pozorovat klesající trend rezonanční frekvence membrány se stoupající plošnou hmotností vzorku. Chování neodpovídající trendu můžeme sledovat u vzorků s nejnižší plošnou hmotností ( $2,14 \text{ g.m}^{-2}$ ), kde je první rezonanční frekvence nižší než je předpokládáno. Tento jev je zřejmě způsoben velmi nízkou tloušťkou vzorku a tedy odlišným chováním při zatěžování.

Na obr. 51 je zobrazena závislost rezonanční frekvence na plošné hmotnosti vzorků síťovaných. I zde je možné sledovat tentýž trend, výjimku tvoří opět vzorky s nejnižší plošnou hmotností. U síťovaných vzorků je možné sledovat nejasný trend vzorků protlačovaných pomocí indentoru s průměrem 10 mm, kde je možno pozorovat, jak rezonanční frekvence se stoupající plošnou hmotností klesá, přičemž vzorek s nejvyšší plošnou hmotností ( $26,32 \text{ g.m}^{-2}$ ) opět vlastní frekvenci zvedne.

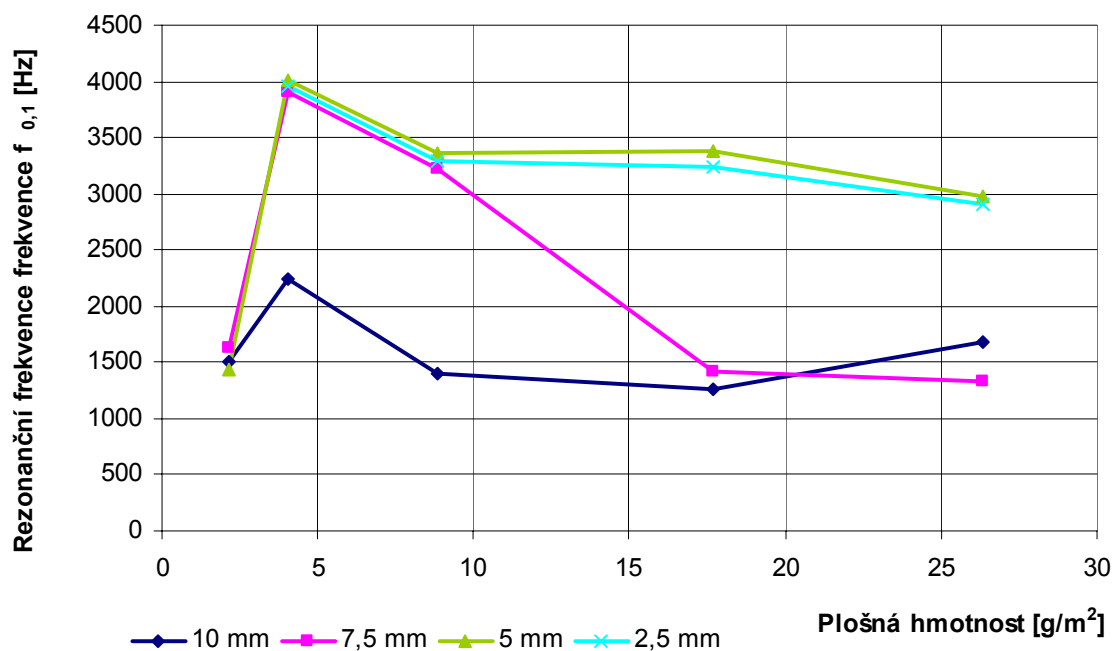
Výše popsané chování potvrzují i ostatní závislosti, jež byly studovány při dalších hodnotách průhybu  $w$  (uvedeny v příloze č. 10).

Lze tedy tvrdit, že byl potvrzen teoretický předpoklad (viz [14]), který předpovídá pokles rezonanční frekvence kruhové membrány při vzrůstu plošné hmotnosti vrstvy.





Obr. 50: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na plošné hmotnosti vzorků nesítovaných pro různá vtlačovaná tělesa. Rezananční frekvence stanovena pomocí modulu pružnosti.



Obr. 51: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na plošné hmotnosti vzorků sítovaných pro různá vtlačovaná tělesa. Rezananční frekvence stanovena pomocí modulu pružnosti.

#### ***4.6 Závislost rezonanční frekvence (stanovené pomocí měření činitele zvukové pohltivosti) na modulu pružnosti vzorku***

Tato kapitola diskutuje závislost akustické vlastnosti materiálu, která je reprezentována rezonanční frekvencí  $f_{0,1}$ , na mechanické vlastnosti, za níž byl zvolen modul pružnosti.

Pohltivé charakteristiky vzorků byly proměřovány při dvou různých vzdálenostech odrazivé stěny, a to 30 a 50 mm, různých plošných hmotnostech vzorku a odlišném splnění parametru síťování.

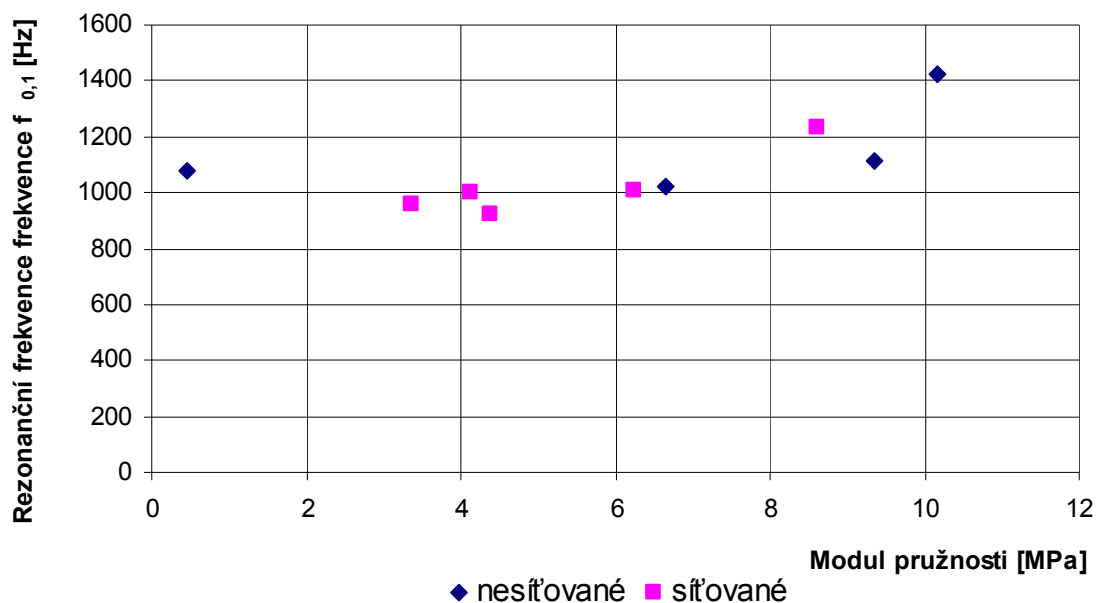
Z důvodu nekonstantního chování modulu pružnosti, bylo i v tomto vyhodnocení pracováno s pevnou hodnotou průhybu  $w$ , který byl sledován ve čtyřech bodech, a to  $v$ : 1, 2, 3 a 4 mm. Pro názorné porovnání byly vybrány závislosti při hodnotě průhybu  $w = 2$  mm. Rychlost protlačování je 150 mm/min.

V jednotlivých grafech jsou porovnávány závislosti vzorků síťovaných a nesíťovaných při totožné vzdálenosti od odrazivé stěny, pro jednotlivá tělesa a jednotlivé hodnoty průhybu  $w$ .

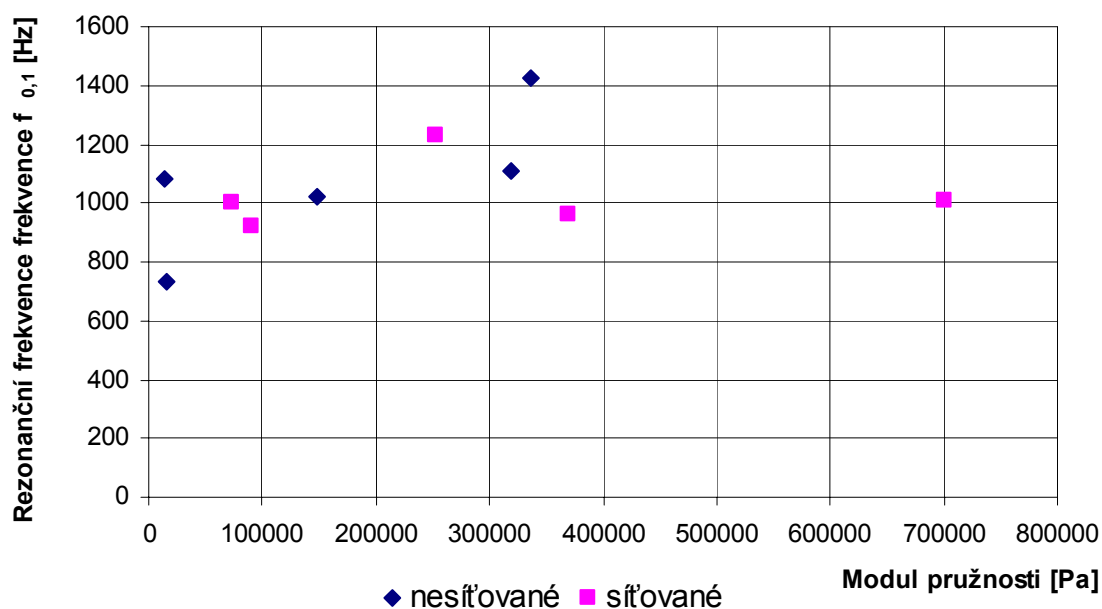
Podle teoretického předpokladu [14] by se rezonanční frekvence vzorku měla zvyšovat spolu se vzrůstem modulu pružnosti, jak je zřejmé ze vzorce (38).

Výše popsany předpoklad je možné pozorovat pouze u vzorků, jež byly protlačovány pomocí indentoru průměru 2,5 mm a činitel zvukové pohltivosti měřen při vzdálenosti odrazivé stěny 30 mm, viz obr. 52. V tomto případě je možné sledovat zřejmý vzrůst vlastní frekvence membrány při vyšších hodnotách modulu pružnosti.

Při protlačování ostatními tělesy není možné pozorovat jasný trend, výsledky nejsou jednoznačné, viz obr. 53 a příloha č. 11.



Obr. 52: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  (stanovené pomocí měření činitele zvukové pohltivosti) na modulu pružnosti vzorku, průměr vtlačovaného tělesa 2,5 mm, měření činitele  $\alpha$  při vzdálenosti odrazové stěny 30 mm, hodnota průhybu 2 mm.



Obr. 53: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  (stanovené pomocí měření činitele zvukové pohltivosti) na modulu pružnosti vzorku, průměr vtlačovaného tělesa 10 mm, měření činitele  $\alpha$  při vzdálenosti odrazové stěny 30 mm, hodnota průhybu 2 mm.

## Závěr

Tato práce studovala pohltivé vlastnosti kruhových nanovlákných membrán vyrobených z roztoku polyvinylalkoholu. Dále se pak zabývala stanovením rezonanční frekvence nanovlákných vzorků pomocí modulu pružnosti, jež byl určen z dat získaných zkouškou CBR.

Měření bylo provedeno pro vzorky, jež se sestávaly z nanovrstvy o plošných hmotnostech 26,3; 17,7; 8,8; 4,1 a 2,1 g.m<sup>-2</sup> napnuté na papírovém mezikruží. Vzorky se odlišovaly plošnou hmotností, dále pak parametrem síťování. Měření činitele zvukové pohltivosti bylo provedeno pro dvě různé vzdálenosti odrazivé stěny. Při zkoušce CBR bylo použito čtyř typů indentorů lišící se průměrem.

Nejprve byl Dvou mikrofonomovou impedanční tubicí proměřen činitel zvukové pohltivosti a studií pohltivých maxim stanoveny vlastní frekvence jednotlivých vzorků. Porovnáván byl vliv plošné hmotnosti vzorků, parametru síťování a vzdálenosti odrazivé stěny na hodnoty činitele zvukové pohltivosti.

Ze získaných grafů (obr. 41 a 42) je patrné, že se vzrůstající plošnou hmotností činitel  $\alpha$  též roste. Dále je možno vidět při zvyšování plošné hmotnosti vzorků posun rezonančních frekvencí k nižším hodnotám. Rozdílné pohlcování zvuku lze sledovat u vrstev vyrobených klasicky a u vrstev vytvořených vícevrstevým nanášením.

Vliv parametru síťování je zřejmý z grafů (obr. 43 a 44). Lze konstatovat, že vrstvy, jež byly při výrobě síťovány vykazují vyšší hodnoty činitele zvukové pohltivosti oproti vzorkům nesíťovaným. Výjimku tvoří pouze nanovlákná membrána s nejnižší plošnou hmotností, kde vyšší hodnoty činitele  $\alpha$  vykazuje vzorek nesíťovaný.

Vzdálenost odrazivé stěny též výrazně ovlivňuje průběh pohlcování vzorku (obr. 46 a 47). Obecně lze říci, že vyšších hodnot činitele zvukové pohltivosti dosahují vzorky umístěné ve větší vzdálenosti od odrazivé stěny. Při použití menší vzdálenosti vzorku od odrazivé stěny dochází k pohlcování zvuku již při nižších frekvencích.

Dále byl studován vliv plošné hmotnosti vzorku na rezonanční frekvenci, která byla stanovena dvěma způsoby. Jedním z nich byla studie rezonančních maxim grafů získaných měření činitele zvukové pohltivosti, druhým způsobem bylo stanovení rezonanční frekvence pomocí modulu pružnosti.

Za účelem stanovení modulu pružnosti byla provedena zkouška CBR, pomocí níž byla snímána síla působící indentorem na vzorek v závislosti na posunu čelistí. Bylo zjištěno, že modul pružnosti není konstantní a je závislý na průhybu membrány  $w$ . Tento jev je způsoben deformací struktury materiálu již při velmi nízkém zatěžování. Dále bylo tedy pracováno s konstantní hodnotou průhybu  $w$ , který byl zvolen ve čtyřech bodech.

Studie provedené oběma způsoby zjišťování vlastních frekvencí membrány potvrdily teoretický předpoklad, který předpovídá pokles rezonanční frekvence se vzrůstem plošné hmotnosti vzorku (obr. 48, 49, 50 a 51). Výjimečné chování bylo shledáno u vzorků s nejnižší plošnou hmotností, které vykazovaly odlišné chování při zatěžování. Opět se objevují rozdíly v pohlcování zvuku vzorků vyrobených klasicky a vícevrstevným nanášením.

Jako poslední byla studována závislost akustických vlastností vzorku, reprezentovaná rezonanční frekvencí (stanovenou pomocí měření činitele zvukové pohltivosti) na mechanické vlastnosti, kterou zastupoval modul pružnosti v tahu. Z výše uvedených závislostí splňoval předpoklad uvedený v teorii pouze vzorek, který byl zatěžován indentorem o průměru 2,5 mm (obr. 52). V tomto případě je potvrzena závislost, kdy při zvyšování modulu pružnosti vzorku roste též rezonanční frekvence. V případě ostatních měření nebyly shledány jednoznačné závislosti.

Další výzkum by se měl zaměřit na stanovení rezonanční frekvence jinou metodou než je měření činitele zvukové pohltivosti, protože je vlastní frekvence pomocí studie maximálních hodnot pohltivosti velmi obtížné objektivně zjistit, a aby bylo možné učinit jednoznačné vyhodnocení, je nutné provést měření opakovaně.

## Použitá literatura

- [1] *Evropský týden 2005 : Nebezpečný hluk*. Zpracoval kolektiv autorů. 1. vyd. Praha : Výzkumný ústav bezpečnosti práce, 2005. 22 s. ISBN 80-903604-8-3.
- [2] *Nanospider : Sound absorption* [online]. 2005 [cit. 2008-02-06]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.nanospider.cz/aplikace.php?kategorie=4&kategorie\\_s=4&hlavni\\_menu=3&sub\\_menu=4](http://www.nanospider.cz/aplikace.php?kategorie=4&kategorie_s=4&hlavni_menu=3&sub_menu=4)>.
- [3] KRŇÁK, M. *Akustické obklady*. 1. vyd. Praha : VÚZORT, 1971. 254 s.
- [4] LEPIL, O. *Fyzika pro gymnázia : Mechanické kmitání a vlnění*. 1. vyd. Praha : Prometheus, 1994. 135 s. ISBN 80-901619-6-0.
- [5] KOLMER, F., KYNCL, J. *Prostorová akustika*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1980. 244 s.
- [6] NĚMEČEK, P. *Hluk v technické praxi I*. 1. vyd. Liberec : Technická univerzita, 1998. 86 s. ISBN 80-7083-285-1.
- [7] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. 2. vyd. Praha : ČVUT, 2000. 389 s. ISBN 80-01-02246-3.
- [8] SVOBODA, E., et al. *Přehled středoškolské fyziky*. 3. vyd. Praha : Prometheus, 2001. 497 s. ISBN 80-7196-116-7.
- [9] PAULÍN, Z. *Zázraky zvuku*. 1. vyd. Praha : Práce, 1962. 176 s.
- [10] FUKA, J., BĚLAŘ, A. *Mechanika a akustika*. Praha : SPN, 1967. 298 s.
- [11] KUTMAN, O. *Fyzika II : Akustika*. 1. vyd. Praha : ČVUT, 1991. 59 s. ISBN 80-01-00655-7.
- [12] JIŘÍČEK, O. *Úvod do akustiky*. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2002. 146 s. ISBN 80-01-02460-1.
- [13] HORÁK, Z., KRUPKA, F. *Základy technické fyziky I : Mechanika, akustika*. 1. přeprac. vyd. Praha : ČVUT, 1961. 182 s.
- [14] ŠKVOR, Z. *Akustika a elektroakustika*. 1. vyd. Praha : Academia, 2001. 527 s. ISBN 80-200-0461-0.
- [15] BELZA, J., KRŇÁK, M., VAVŘINOVÁ, J. *Katalog akustických materiálů pro použití v motorových vozidlech*. Praha : VÚZORT, 1985. 158 s.

- 
- [16] *Product Data of Impedance Tube Kit Type 4206* [online]. [cit. 2008-02-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.bksv.com/pdf/Bp1039.pdf>>.
- [17] BRÜEL & KJAER, Denmark: *Sound & Vibration Measurement*. Naerum 2000 – 2002.
- [18] JIRSÁK, O., KALINOVÁ, K. *Netkané textilie*. 1. vyd. Liberec : Technická univerzita, 2003. 129 s. ISBN 80-7083-746-2.
- [19] RŮŽIČKOVÁ, J. *Elektrostatické zvlákňování nanovláken*. 2. nezměněné vyd. Liberec : Technická univerzita, 2006. 54 s. ISBN 80-7372-066-3.
- [20] FORMHALS, A.: US patent 1,975,504, 1934.
- [21] FORMHALS, A.: US patent 2,160,962, 1939.
- [22] FORMHALS, A.: US patent, 2,187,306, 1940.
- [23] FORMHALS, A.: US patent, 2,323,025, 1943.
- [24] FORMHALS, A.: US patent, 2,349,950, 1944.
- [25] HUANG, Z., et al. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. *Composites Science and Technolog.* 2003, vol. 63, no. 15, s. 2223-2253.
- [26] TAYLOR, G. Electrically driven jets . *Proc R Soc London : Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1969, vol. 313, no. 1515, s. 453-475.
- [27] JIRSÁK, O., SANETRŇÍK, F., LUKÁŠ, D., KOTEK, V., MARTINOVÁ, L., CHALOUPEK, J. *Method of nanofibres production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method*, US 2006/0290031 A1
- [28] HRAZDIL, J. *Normy.biz* [online]. c2008 , Aktualizace: 2008-03-01 [cit. 2008-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://shop.normy.biz/detail-polozky.php?katcis=78410>>.
- [29] LABORTECH S.R.O. & LABORTECH TRADING S.R.O. *LaborTech : Zkušební technika a automatizace* [online]. c2007 [cit. 2007-12-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.labortech.cz/download/4.xxx/4.050.pdf>>.
- [30] ZWIKKER, C., KOSTEN, C. W. *Sound absorbing materials*. NY : Elsevier Pub. Co., 1949.
- [31] SHOSHANI, Y. Effect of nonwoven backings on the noise absorption capacity of tufted carpets. *Textile Research Journal*. 1990, vol. 60, no. 8, s. 452.

- 
- [32] SHOSHANI, Y. Studies of textile assemblies used for acoustic control. *Technical Textiles International*. 1993, vol. 2, no. 3, s. 32-34.
- [33] SHOSHANI, Y., ROSENHOUSE, G. Noise insulating blankets made of textiles. *Applied Acoustics*. 1992, vol. 35, no. 2, s. 129-138.
- [34] SHOSHANI, Y., ROSENHOUSE, G. Use of nonwovens in the design of acoustic ceilings. *Proceeding of the INDA conference, St. Peterburg, Florida*. 1995, s. 267-274.
- [35] DELANY, M. E., BAZLEY, E. N. Acoustical properties of fibrous materials. *Applied Acoustics*. 1970, vol. 3, no. 2, s. 105-116.
- [36] SIDES, D. J., ATTENBOROUGH, K., MULHOLLAND, K. A. Application of a generalized acoustic propagation theory to fibrous absorbents. *Journal of Sound and Vibration*. 1971, vol. 19, no. 1, s. 49-64.
- [37] DAHL, M.D., RICE, E.J., GROESBECK, D.E. Effects of fiber motion on the acoustic behaviour of an anisotropic, flexible fibrous material. *Journal Acoust Soc Am*. 1990, vol. 87, no. 1, s. 54-59.
- [38] ALLARD, J. F., CHAMPOUX, Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials. *Journal Acoust Soc Am*. 1992, vol. 91, is. 6, s. 3346-3353.
- [39] SHOSHANI, Y., YAKUBOV, Y. A model for calculating the noise absorption capacity of nonwoven fiber webs. *Textile Research Journal*. 1999, vol. 69, no. 7, s. 519-526.
- [40] SHOSHANI, Y., YAKUBOV, Y. Numerical assessment of maximal absorption coefficients for nonwoven fiberwebs. *Applied Acoustics*. 2000, vol. 59, no. 1, s. 77-87.
- [41] VORONINA, N. Acoustic properties of fibrous materials. *Applied Acoustics*. 1994, vol. 42, no. 2, s. 165-174.
- [42] VORONINA, N. Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material. *Applied Acoustics*. 1996, vol. 48, no. 2, s. 121-132.
- [43] VORONINA, N. An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity. *Applied Acoustics*. 1997, vol. 51, no. 2, s. 181-198.
- [44] VORONINA, N. An empirical model for elastic porous materials. *Applied Acoustics*. 1998, vol. 55, no. 1, s. 67-83.



- 
- [45] VORONINA, N. Acoustic properties of synthetic films. *Applied Acoustics*. 1996, vol. 49, no. 2, s. 127-140.
- [46] VORONINA, N. Comparison between theoretical and empirical models for elastic porous materials. *Applied Acoustics*. 1999, vol. 58, no. 3, s. 255-260.
- [47] BIOT, M. A. Theory of elastic waves in a fluid saturated porous solid : Higher frequency range. *Journal Acoust Soc Am*. 1956, vol. 28, no. 2, s. 179-191.
- [48] ALLARD, J.F., AKINE, A., DEPOLIER, C. Acoustical properties of reticulated foams with high and medium flow resistance. *Journal Acoust Soc Am*. 1986, vol. 79, no. 6, s. 1734-1740.
- [49] LAMBERT, R. F. Acoustic resonance in highly porous, flexible, layered fine fiber materials. *Journal Acoust Soc Am*. 1993, vol. 93, no. 3, s. 1227-1234.
- [50] LOU, C. W., LIN, J. H., SU, K. H. Recycling polyester and polypropylene nonwoven selvages to prduce functional sound absorption composites. *Textile Research Journal*. 2005, vol. 75, no. 5, s. 390-394.
- [51] CHEN, Y., JIANG, N. Carbonized and activated non-wovens as high-performance acoustic materials : Part I Noise absorption. *Textile Research Journal*. 2007, vol. 77, no. 10, s. 785-787.
- [52] GARAI, M., POMPOLI, F. A simple empirical model of polyester fibre material for acoustic applications. *Applied Acoustics*. 2005, vol. 66, no. 12, s. 1383-1398.
- [53] COATES, M., KIERZKOWSKI, M. Acoustic textiles - lighter, thinner and more sound-absorbent. *Technical Textiles International*. 2002, vol. 11, no. 7, s. 15-18.
- [54] SAKAGAMI, K., et al. Detailed analysis of the acoustic properties of a permeable membrane. *Applied Acoustics*. 1998, vol. 54, no. 2, s. 93-111.
- [55] TAKAHASHI, D., SAKAGAMI, K., MORIMOTO, M. Acoustic properties of permeable membranes. *Journal Acoust Soc Am*. 1996, vol. 99, s. 3003-3009.
- [56] SAKAGAMI, K., et al. Sound absorption of a cavity-backed membrane : A step towards design method for membrane-type absorbers. *Applied Acoustics*. 1996, vol. 49, no. 3, s. 237-247.
- [57] SAKAGAMI, K., et al. Acoustic properties of an infinite elastic plate with a back cavity . *Acustica*. 1993, vol. 78, s. 288-295.
- [58] KIYAMA, M., et al. A basic study on acoustic properties of double-leaf membranes. *Applied Acoustics*. 1998, vol. 54, no. 3, s. 239-254.

- 
- [59] SAKAGAMI, K., KIYAMA, M., MORIMOTO, M. Acoustic properties of double-leaf membranes with a permeable leaf on sound incidence side. *Applied Acoustics*. 2002, vol. 63, no. 8, s. 911-926.
- [60] KANG, J., FUCHS, H. V. Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space . *Journal of Sound and Vibration*. 1999, vol. 220, no. 5, s. 905-920.
- [61] KANG, J., FUCHS, H. V. Effect of water-films on the absorption of membrane absorbers. *Applied Acoustics*. 1999, vol. 56, no. 2, s. 127-135.
- [62] SAKUMA, T., IWASE, T., YASUOKA, M. An approach utilizing membrane materials to regulate modal characteristics of rooms. *Applied Acoustics*. 2000, vol. 61, no. 4, s. 455-467.
- [63] ACKERMANN, U., FUCHS, H. V., RAMBAUSEK, N. Sound absorbers of a novel membrane construction . *Applied Acoustics*. 1988, vol. 25, no. 3, s. 197-215.
- [64] FROMMHOLD, W., FUCHS, H. V., SHENG, S. Acoustic performance of membrane absorbers. *Journal of Sound and Vibration*. 1994, vol. 170, no. 5, s. 621-636.
- [65] RAYLEIGH, L. *Theory of sound*. NY : Dover Publications, 1945.
- [66] JENKINS, C. H., KORDE, U. A. Membrane vibration experiments : An historical review and recent results. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, vol. 295, 3-5, s. 602-613.
- [67] WANG, C. Y. Some exact solution of the vibration of non-homogenous membranes. *Journal of Sound and Vibration*. 1998, vol. 210, no. 4, s. 555-558.
- [68] GOTTLIEB, H. P. W. Exact solutions for vibrations of some annular membranes with inhomogeneous radial densities. *Journal of Sound and Vibration*. 2000, vol. 233, no. 1, s. 165-170.
- [69] JABAREEN, M., EISENBERGER, M. Free vibrations of non-homogenous circular and annular membranes. *Journal of Sound and Vibration*. 2001, vol. 240, no. 3, s. 409-429.
- [70] WANG, C. Y. Vibration of an annular membrane attached to a free rigid core. *Journal of Sound and Vibration*. 2003, vol. 260, no. 4, s. 776-782.

- 
- [71] PINTO, F. Analytical and experimental investigation on a vibrating annular membrane attached to a central free, rigid core. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, vol. 291, no. 3-5, s. 1278-1287.
- [72] WANG, C. Y. Fundamental models of a circular membrane with radial constraints on the boundary. *Journal of Sound and Vibration*. 1999, vol. 220, no. 3, s. 559-563.
- [73] KWAK, M. K. Vibration of circular membranes in contact with water. *Journal of Sound and Vibration*. 1994, vol. 178, no. 5, s. 688-690.

## Seznam příloh

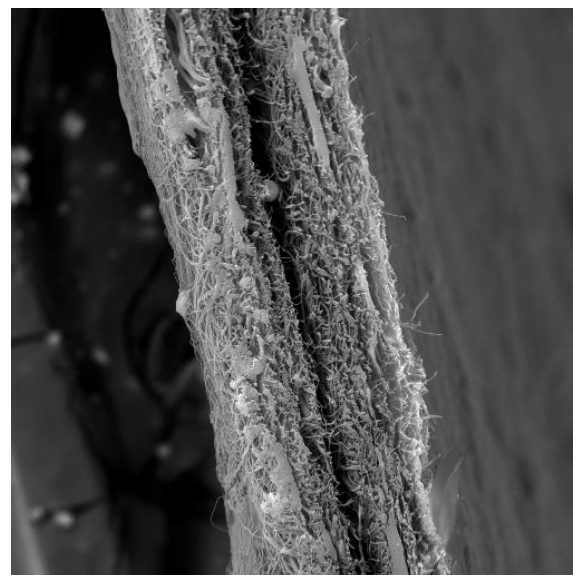
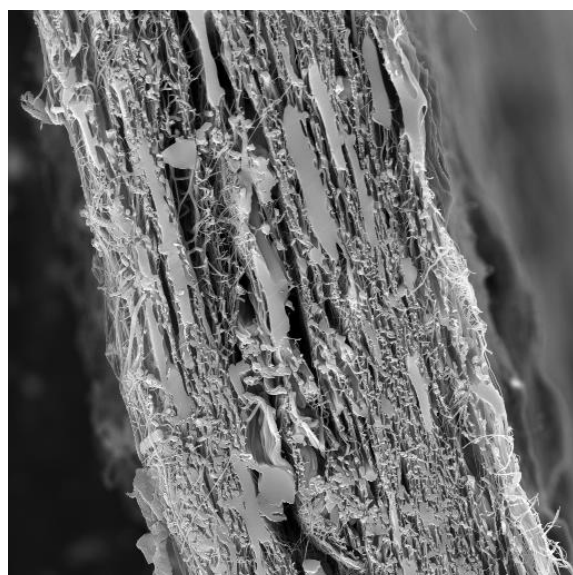
- Příloha č. 1:** Složení zvláknovaného roztoku polyvinylalkoholu.
- Příloha č. 2:** Obr. 54 - 56: Obrázky příčných řezů nanovláknennou strukturou vzorků.
- Příloha č. 3:** Tab. 6: Naměřené hodnoty tloušťek nanovláknenných vrstev se základními statistickými charakteristikami.
- Příloha č. 4:** Tab. 7 - 10: Rezonanční charakteristiky vzorků zjišťované studií maximálních hodnot v grafech závislosti činitele zvukové pohltivosti na frekvenci zvuku.
- Příloha č. 5:** Obr. 57 - 61: Závislost síly působícího indentoru na posunu čelistí.
- Příloha č. 6:** Obr. 62 - 65: Závislost modulu pružnosti vzorku na průhybu membrány pro jednotlivé indentory, rychlost posuvu průtlačníku 150 mm/min.  
Obr. 66: Závislost modulu pružnosti vzorku na průhybu membrány pro indentoru 10 mm při rychlosti posuvu 30mm/min.
- Příloha č. 7:** Obr. 67 - 68: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti.
- Příloha č. 8:** Obr. 69: Vliv parametru síťování nanovláknenné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti.
- Příloha č. 9:** Obr. 70: Vliv vzdálenosti měřeného vzorku od odrazivé stěny na hodnoty činitele zvukové pohltivosti.
- Příloha č. 10:** Obr. 71 - 73: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na plošné hmotnosti vzorků. Rezonanční frekvence stanovena pomocí modulu pružnosti.
- Příloha č. 11:** Obr. 74 - 81: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na modulu pružnosti vzorku. Rezonanční frekvence stanovena pomocí měření činitele zvukové pohltivosti.

---

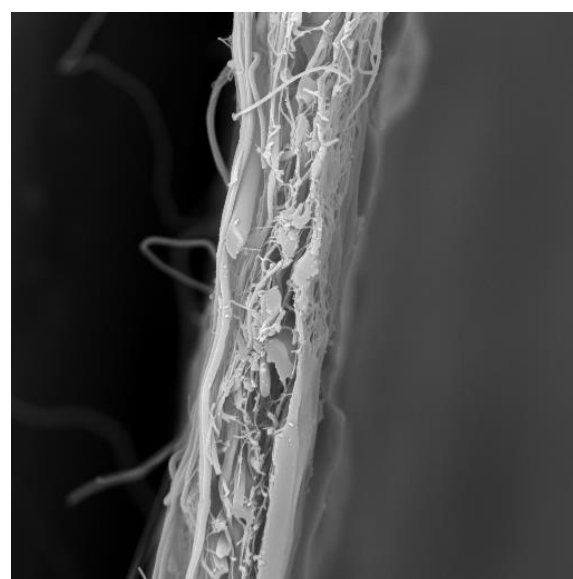
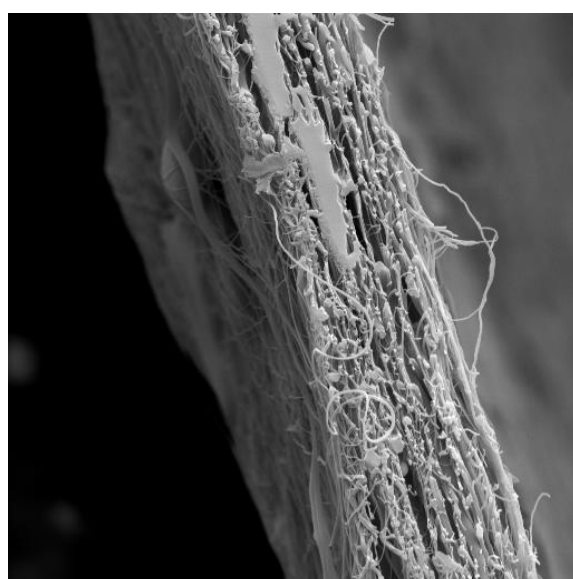
**Příloha č. 1**

Složení zvlákněvaného roztoku polyvinylalkoholu:

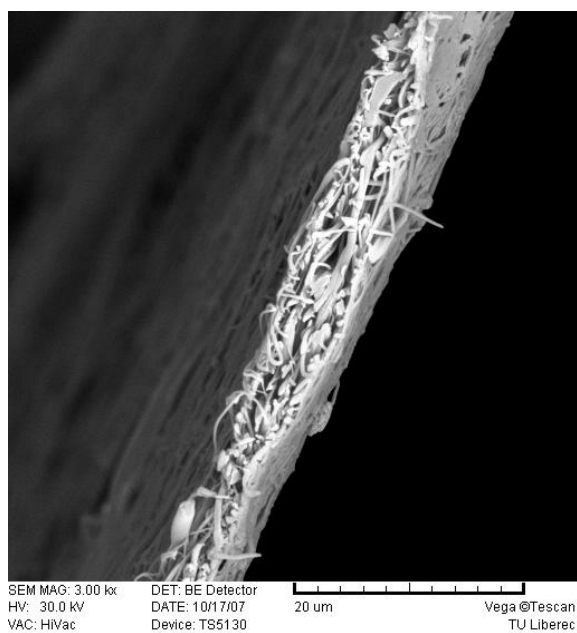
- 1 l .....Polyvinylalkohol (16 %)
- 9,6 ml .....Glyoxal (40%)
- 5 ml .....H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> – Kyselina fosforečná (85 %)
- 250 ml .....H<sub>2</sub>O – Destilovaná voda

**Příloha č. 2**

*Obr. 54: Snímky příčného řezu nanovlákněné vrstvy vzorku označeného 1S (vlevo) a 2S (vpravo).*



*Obr. 55: Snímky příčného řezu nanovlákněné vrstvy vzorku označeného 3S (vlevo) a 4S (vpravo).*



*Obr. 56: Snímek příčného řezu nanovláknenné vrstvy vzorku označeného 5S.*

**Příloha č. 3:** Tab. 6: Naměřené hodnoty tloušťek nanovláknenných vrstev.

Označení vzorku	1S	1N	2S	2N	3S	3N	4S	4N	5S	5N
Naměřená data [ $\mu\text{m}$ ]	92,23	73,79	47,18	39,61	35,21	21,28	16,07	8,87	3,43	5,92
	88,49	72,14	48,62	39,41	32,94	22,84	14,63	8,19	3,66	6,57
	90,11	71,75	49,21	38,70	33,10	23,29	13,63	8,63	4,33	6,22
	88,13	70,57	48,34	38,52	30,79	21,44	12,97	9,35	4,50	5,99
	90,47	71,63	47,44	39,75	31,86	21,32	12,91	8,56	4,56	6,11
	94,18	73,72	48,37	41,72	31,76	20,92	14,41	7,84	4,19	6,52
	92,12	73,85	48,54	39,77	32,07	22,89	15,65	8,61	3,96	6,29
	92,30	72,11	47,17	39,90	32,05	23,55	14,99	7,20	3,70	6,96
	92,78	73,10	48,08	41,05	28,25	20,94	15,86	8,96	3,32	7,61
	87,03	70,63	49,49	39,02	33,84	22,18	15,74	8,82	3,81	7,09
	92,49	88,13	55,38	69,50	40,65	32,39	11,56	7,21	5,95	5,86
	90,42	92,01	54,95	71,73	40,02	30,99	11,12	7,50	5,44	5,69
	88,97	93,77	54,61	71,66	38,87	31,53	11,37	6,88	4,84	5,67
	94,31	94,46	54,26	71,91	38,33	31,73	11,44	6,77	4,43	5,73
	90,30	92,54	54,66	70,91	36,23	32,36	11,88	7,44	5,35	5,63
	93,74	93,80	55,96	70,61	37,73	31,25	11,50	7,85	4,56	5,79
	94,00	92,14	56,08	70,09	39,12	32,88	11,61	8,41	4,84	5,73
	96,85	91,92	55,03	69,11	39,66	31,81	11,65	9,03	5,05	5,29
	87,94	91,78	56,17	70,31	39,17	34,33	11,94	9,19	5,35	4,93
	93,54	83,99	56,23	67,33	37,51	34,46	13,16	9,06	4,93	5,70
	90,38	88,13	83,57	73,86	32,32	17,38	13,08	10,09	5,67	7,14
	88,13	90,47	85,05	71,64	32,62	18,50	12,23	10,77	5,81	6,06
	92,01	94,18	89,19	69,54	32,30	18,40	11,53	9,95	5,22	6,61
	93,77	92,12	89,53	69,92	32,43	17,93	11,71	8,81	4,95	5,98
	94,46	92,30	86,50	70,82	33,88	18,99	12,64	11,41	6,19	6,72
	92,54	92,78	83,05	68,21	33,38	20,08	12,84	10,59	6,33	6,06
	93,80	87,03	85,50	66,60	33,85	17,89	12,69	8,99	6,10	6,51
	92,14	92,49	87,36	68,43	36,36	19,92	12,62	9,41	5,63	5,97
	91,92	90,42	86,85	69,58	35,17	19,82	11,18	9,44	6,32	5,93
	91,78	88,97	85,71	67,80	35,34	20,20	11,45	9,82	4,80	5,90
	83,99	82,60	61,34	61,40	26,38	27,21	11,62	9,21	6,87	5,02
	87,07	78,04	59,98	60,01	28,50	26,67	10,56	9,68	6,57	4,94
	85,47	75,09	59,29	60,49	30,18	25,19	11,83	8,80	6,27	4,57
	85,80	73,18	62,33	61,76	30,85	25,91	12,46	9,71	6,73	4,82
	85,84	73,00	67,72	62,89	30,05	27,92	12,79	10,45	7,06	4,58
	88,34	72,81	68,33	61,81	31,87	27,27	11,96	9,54	6,44	4,37
	91,31	71,09	65,84	58,83	33,07	28,03	10,68	10,88	6,67	4,24
	93,82	75,29	65,89	60,94	33,07	29,34	12,84	11,48	6,55	4,19
	91,90	75,83	61,23	57,99	34,24	29,84	9,10	10,66	5,88	4,32
	92,56	76,45	65,50	61,72	33,54	29,17	11,61	9,88	6,25	4,41
	85,65	85,06	54,26	66,57	24,73	25,49	14,96	10,58	7,14	4,99
	84,63	87,07	54,52	64,71	23,83	28,01	11,56	10,44	6,79	4,95
	87,90	91,92	53,61	63,80	24,15	25,69	11,86	9,75	7,17	5,23
	87,65	93,77	50,89	63,72	23,86	24,78	11,61	9,14	6,49	4,51
	80,09	89,56	52,50	61,46	22,49	26,19	11,40	9,09	6,69	4,11
	82,55	92,01	53,24	63,79	25,34	28,03	11,59	9,95	6,83	4,57
	86,44	87,56	55,48	61,09	21,31	26,23	12,07	8,99	6,91	4,28
	87,76	82,55	55,06	64,44	20,02	30,56	11,86	8,86	6,78	4,38
	88,83	93,82	54,07	62,71	20,55	29,92	12,39	11,42	6,65	5,40
	85,06	94,31	51,70	64,39	23,17	28,23	13,80	10,45	6,62	4,62
<b>Průměrná hodnota [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>89,88</b>	<b>83,95</b>	<b>61,42</b>	<b>60,83</b>	<b>31,76</b>	<b>25,66</b>	<b>12,49</b>	<b>9,25</b>	<b>5,61</b>	<b>5,53</b>
Sm. odch. [ $\mu\text{m}$ ]	3,59	8,89	13,63	11,35	5,45	4,93	1,48	1,17	1,12	0,90
Var. koef. [-]	0,04	0,11	0,22	0,19	0,17	0,19	0,12	0,13	0,20	0,16



**Příloha č. 4**

<b>Sít'ované 50 mm</b>				
Označení vzorku	1. rezonance ( $f_1$ ) [Hz]	2. rezonance ( $f_2$ ) [Hz]	3. rezonance ( $f_3$ ) [Hz]	4. rezonance ( $f_4$ ) [Hz]
<b>1S 50</b>	800	1464 (1836)	2776 (2878)	4496 (3923)
<b>2S 50</b>	840	1696 (1928)	3136 (3023)	4816 (4119)
<b>3S 50</b>	760	1280 (1745)	2472 (2735)	4640 (3725)
<b>4S 50</b>	832	1464 (1910)	2832 (2994)	4272 (4080)
<b>5S 50</b>	1128	2464 (2589)	4552 (4059)	? (5521)

Tab. 7: Rezonanční charakteristiky sít'ované nanovrstvy o odlišných plošných hmotnostech ve vzdálenosti 50 mm od odrazivé stěny.

<b>Sít'ované 30mm</b>				
Označení vzorku	1. rezonance ( $f_1$ ) [Hz]	2. rezonance ( $f_2$ ) [Hz]	3. rezonance ( $f_3$ ) [Hz]	4. rezonance ( $f_4$ ) [Hz]
<b>1S 30</b>	960	1376 (2204)	2808 (3455)	4472 (4707)
<b>2S 30</b>	1000	1608 (2295)	3048 (3599)	4600 (4903)
<b>3S 30</b>	920	2112 (2112)	3160 (3311)	4048 (4511)
<b>4S 30</b>	1008	2456 (2314)	3456 (3627)	4712 (4943)
<b>5S 30</b>	1232	2904 (2828)	4272 (4433)	? (6041)

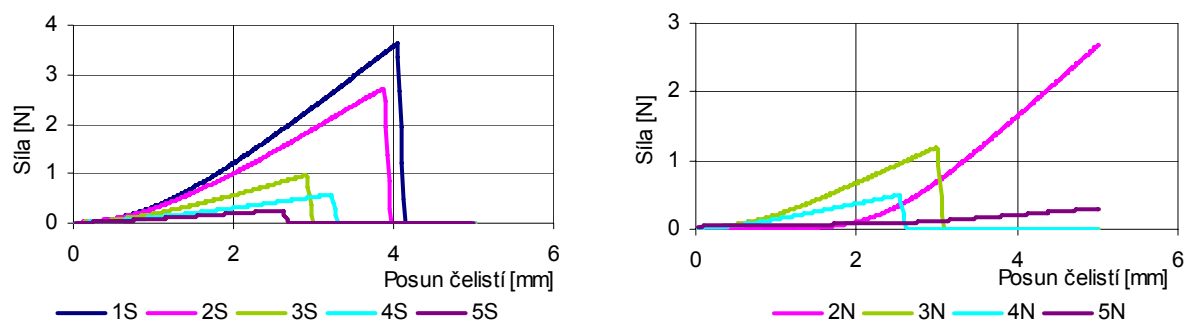
Tab. 8: Rezonanční charakteristiky sít'ované nanovrstvy o odlišných plošných hmotnostech ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny.

<b>Nesít'ované 50mm</b>				
Označení vzorku	1. rezonance ( $f_1$ ) [Hz]	2. rezonance ( $f_2$ ) [Hz]	3. rezonance ( $f_3$ ) [Hz]	4. rezonance ( $f_4$ ) [Hz]
<b>1N 50</b>	824	1688 (1891)	2784 (2965)	4024 (4040)
<b>2N 50</b>	832	1712 (1910)	3096 (2994)	4168 (4080)
<b>3N 50</b>	840	1736 (1927)	3088 (3023)	4544 (4119)
<b>4N 50</b>	520	936 (1194)	1840 (1871)	2472 (2550)
<b>5N 50</b>	744	1728 (1708)	2472 (2677)	4824 (3648)

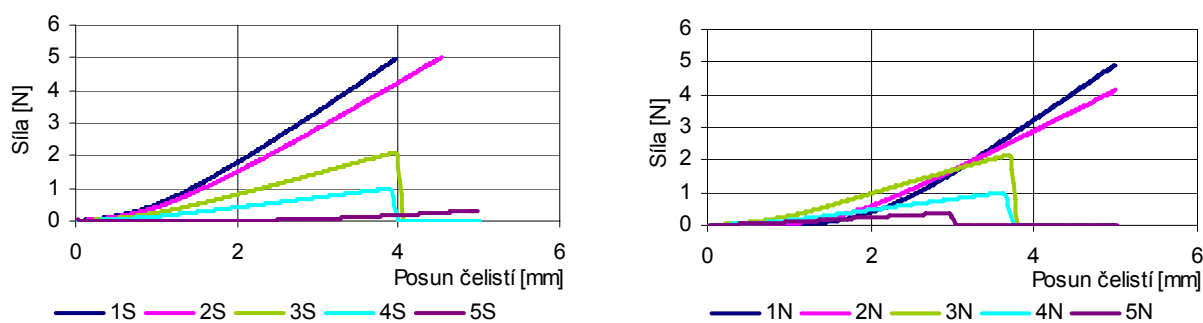
Tab. 9: Rezonanční charakteristiky nesít'ované nanovrstvy o odlišných plošných hmotnostech ve vzdálenosti 50 mm od odrazivé stěny.

<b>Nesít'ované 30mm</b>				
Označení vzorku	1. rezonance ( $f_1$ ) [Hz]	2. rezonance ( $f_2$ ) [Hz]	3. rezonance ( $f_3$ ) [Hz]	4. rezonance ( $f_4$ ) [Hz]
<b>1N 30</b>	736	1632 (1689)	3296 (2649)	3800 (3609)
<b>2N 30</b>	1080	1624 (2479)	3280 (3886)	4992 (5296)
<b>3N 30</b>	1024	1632 (2350)	3080 (3685)	4560 (5021)
<b>4N 30</b>	1112	2920 (2552)	4056 (4002)	? (5452)
<b>5N 30</b>	1424	3496 (3269)	? (5124)	? (6982)

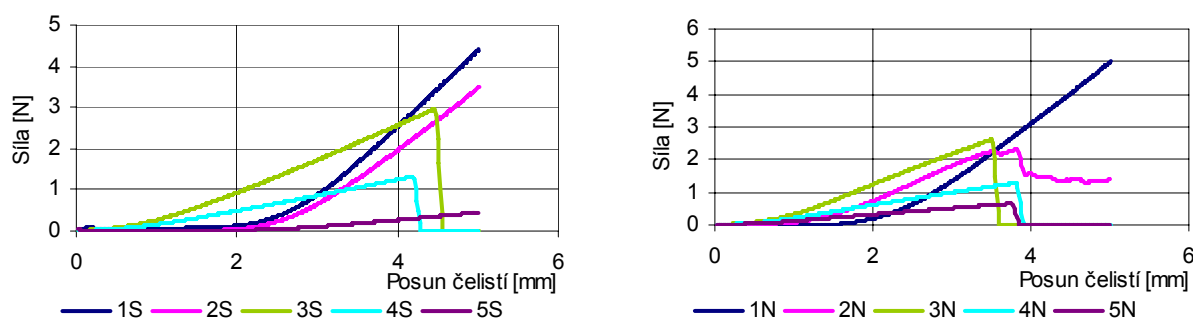
Tab. 10: Rezonanční charakteristiky nesít'ované nanovrstvy o odlišných plošných hmotnostech ve vzdálenosti 30 mm od odrazivé stěny.

**Příloha č. 5**

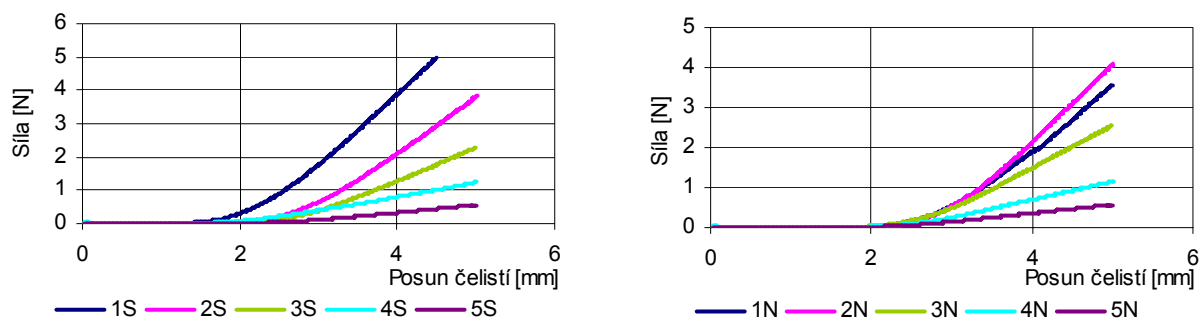
Obr. 57: Závislost působící síly na posunu průbojníku při použití indentoru o průměru 2,5 mm, rychlost protlačování 150 mm/min.



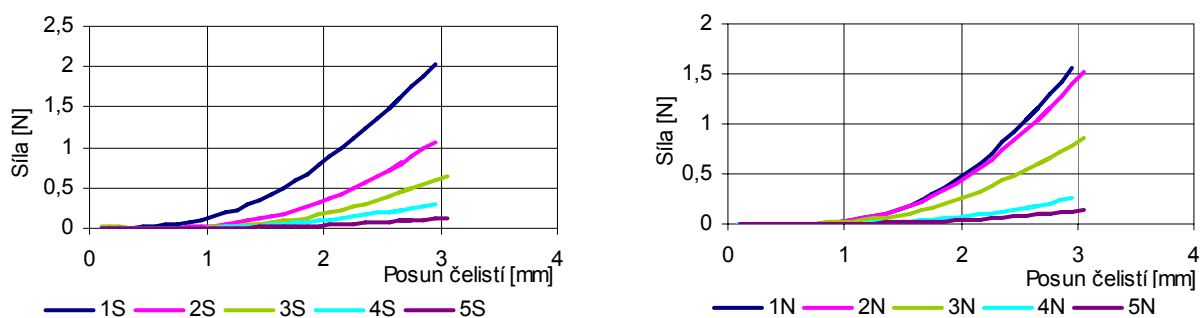
Obr. 58: Závislost působící síly na posunu průbojníku při použití indentoru o průměru 5 mm, rychlost protlačování 150 mm/min.



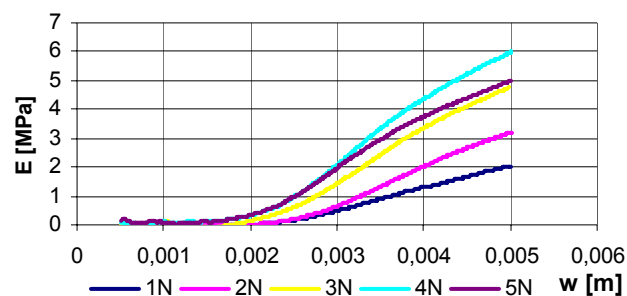
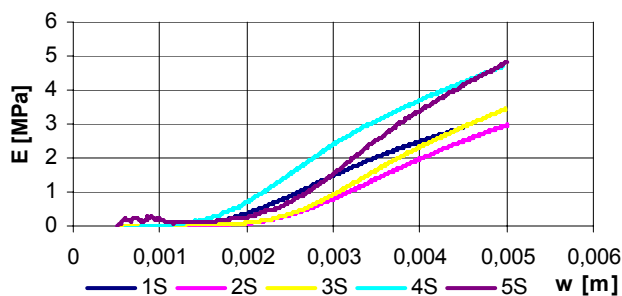
Obr. 59: Závislost působící síly na posunu průbojníku při použití indentoru o průměru 7,5 mm, rychlost protlačování 150 mm/min.



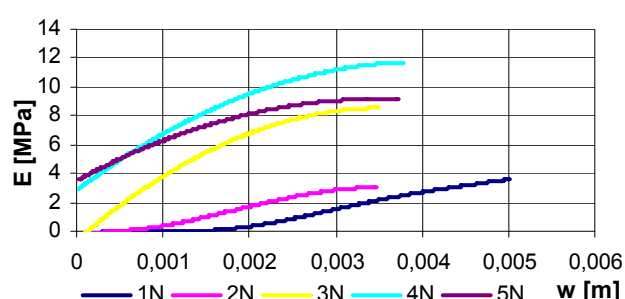
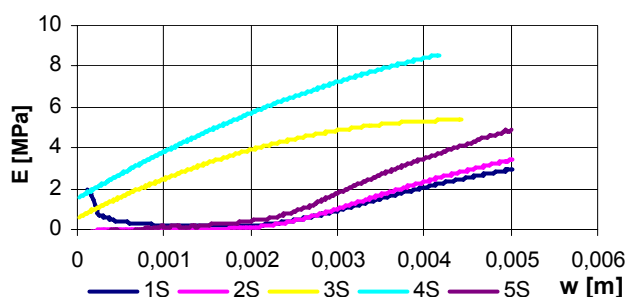
Obr. 60: Závislost působící síly na posunu průbojníku při použití indentoru o průměru 10 mm, rychlost protlačování 150 mm/min.



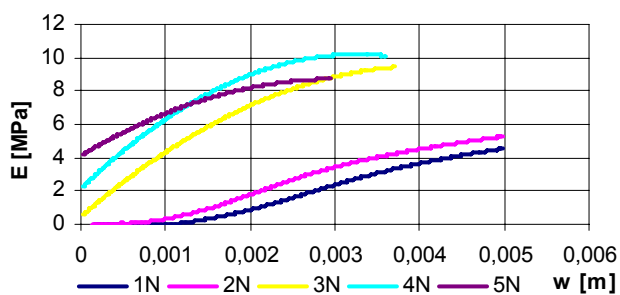
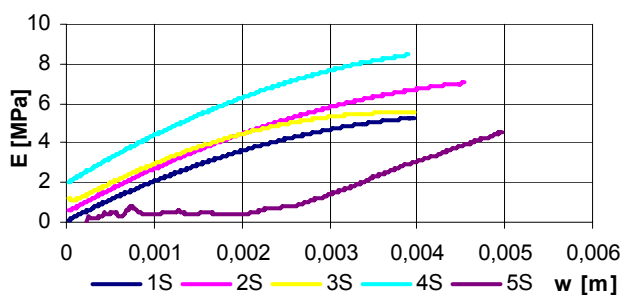
Obr. 61: Závislost působící síly na posunu průbojníku při použití indentoru o průměru 10 mm, rychlost protlačování 300 mm/min.

**Příloha č. 6**

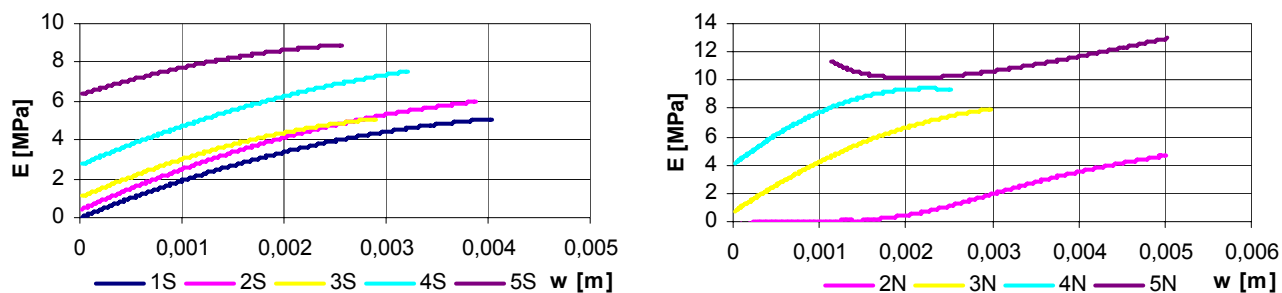
Obr. 62: Závislost modulu pružnosti  $E$  na průhybu  $w$  pro průbojník průměru 10 mm, rychlost protlačování 150 mm/min.



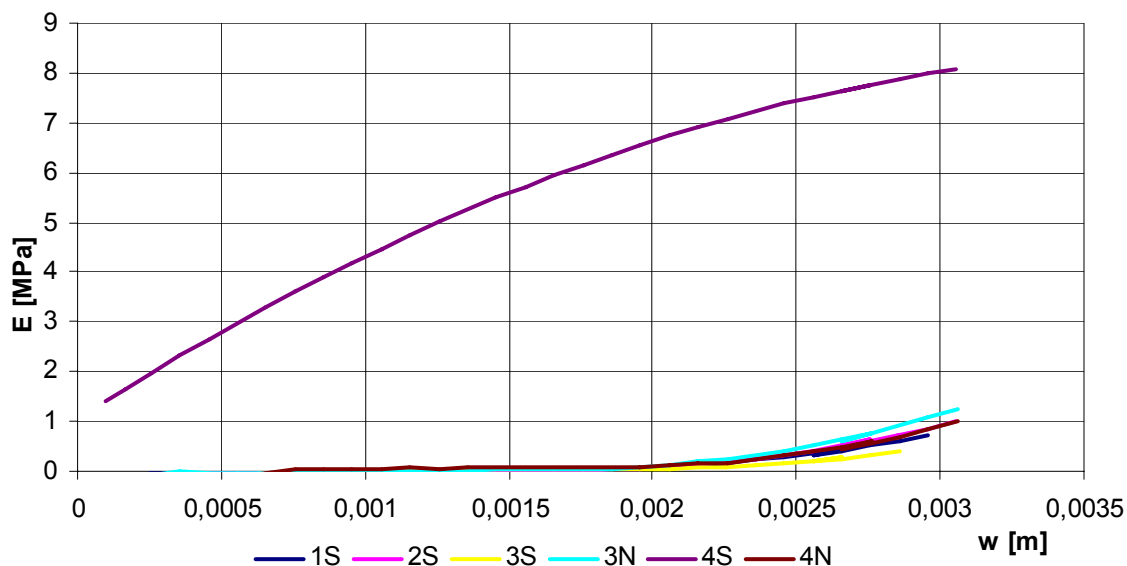
Obr. 63: Závislost modulu pružnosti  $E$  na průhybu  $w$  pro průbojník průměru 7,5 mm, rychlost protlačování 150 mm/min.



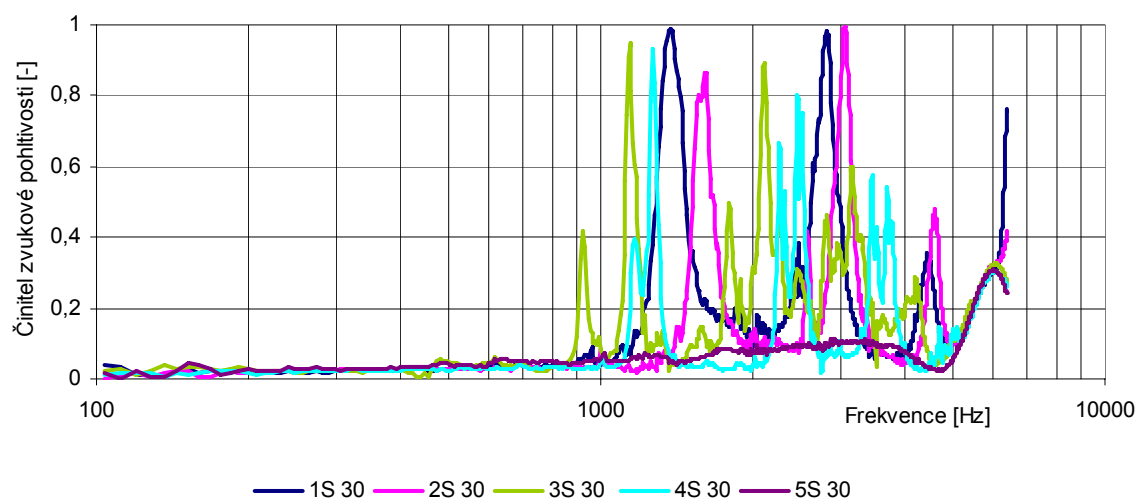
Obr. 64: Závislost modulu pružnosti na průhybu  $w$  pro průbojník průměru 5 mm, rychlost protlačování 150 mm/min.



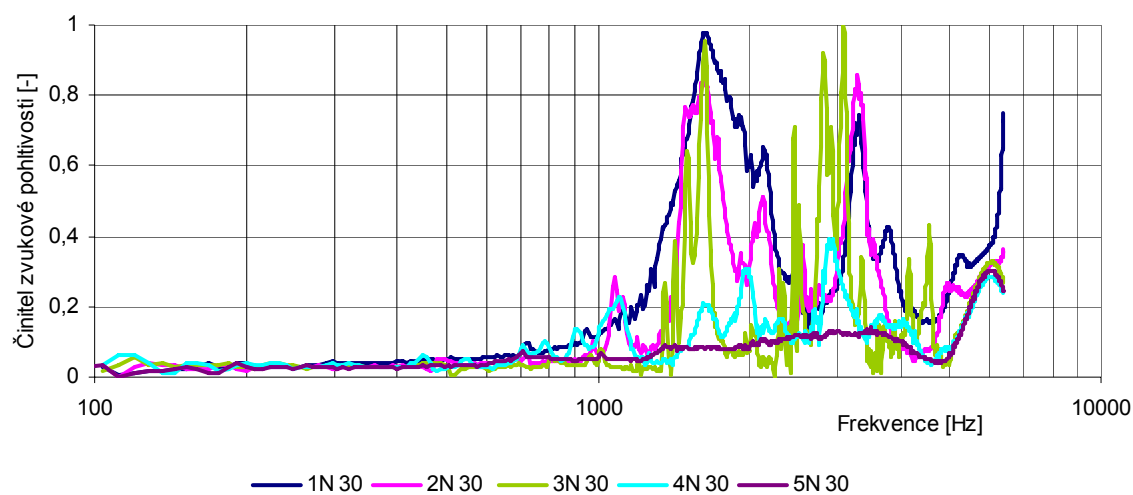
Obr. 65: Závislost modulu pružnosti na průhybu  $w$  pro průbojník průměru 2,5 mm, rychlost protlačování 150 mm/min.



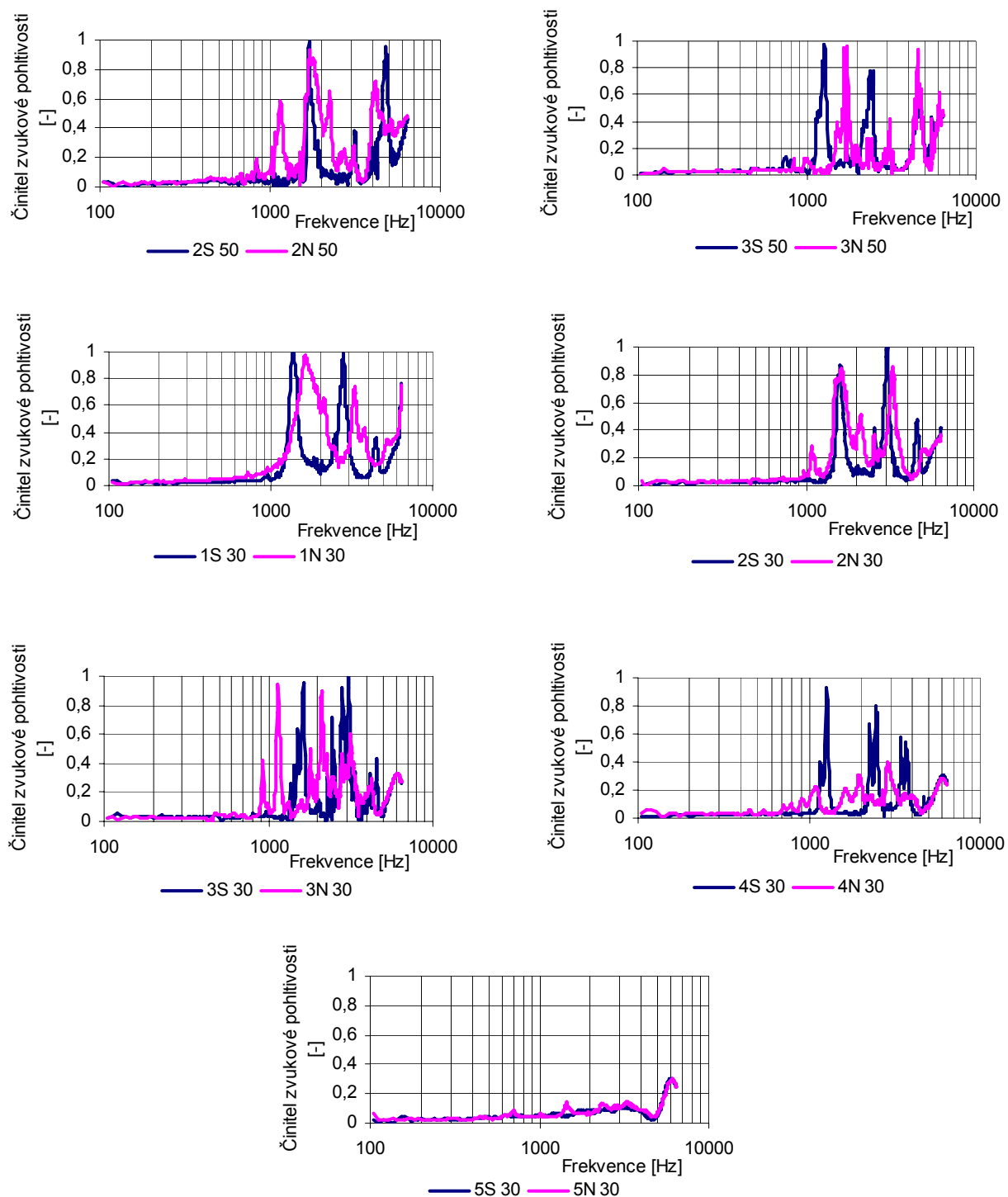
Obr. 66: Závislost modulu pružnosti na průhybu  $w$  pro průbojník průměru 10 mm, rychlost protlačování 300 mm/min.

**Příloha č. 7**

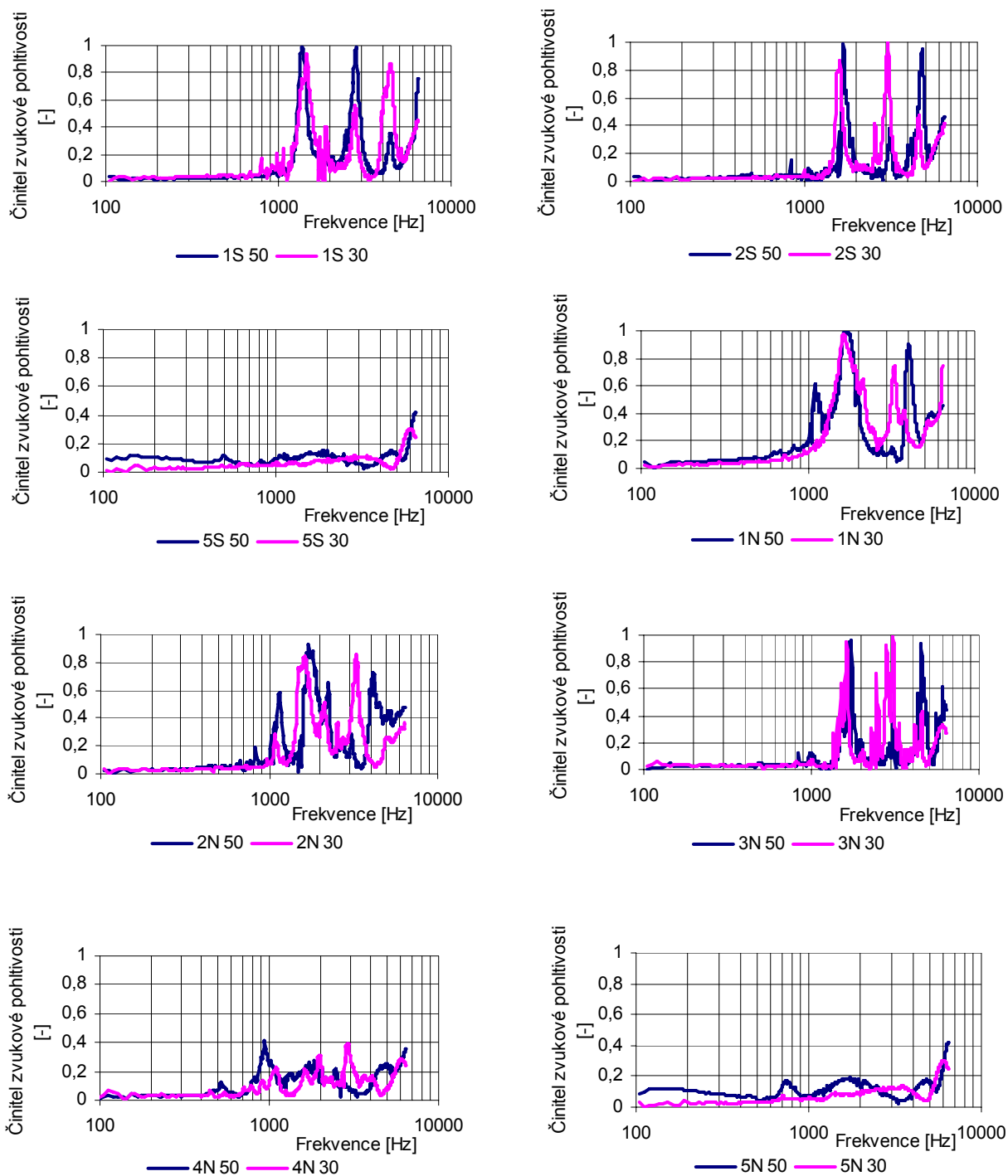
Obr. 67: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy (26,32; 17,71; 8,81; 4,03; 2,14  $\text{g.m}^{-2}$ ), pro vzorky síťované, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm.



Obr. 68: Činitel zvukové pohltivosti v závislosti na frekvenci zvuku a plošné hmotnosti nanovlákněné vrstvy (26,32; 17,71; 8,81; 4,03; 2,14  $\text{g.m}^{-2}$ ), pro vzorky nesíťované, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm.

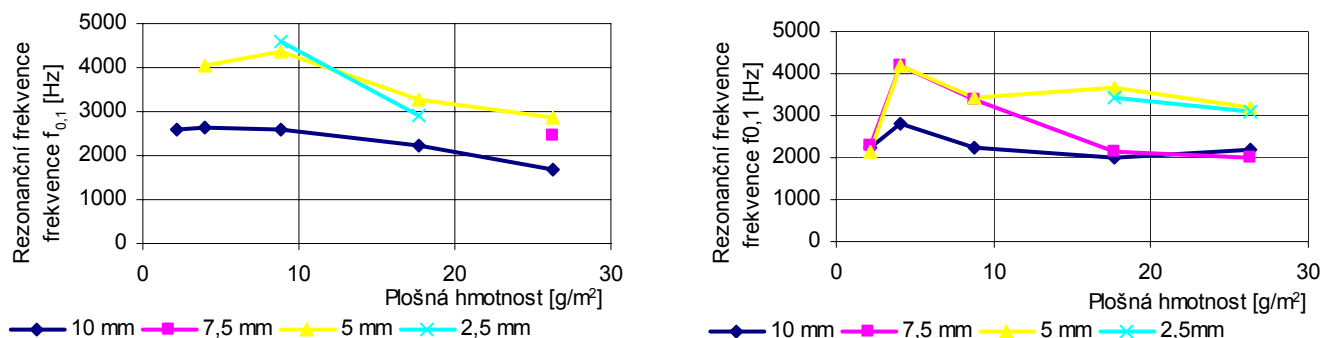
**Příloha č. 8**

Obr. 69: Vliv parametru síťování nanovláknenné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro vzorky odlišných plošných hmotností a rozdílné vzdálenosti odrazivé stěny.

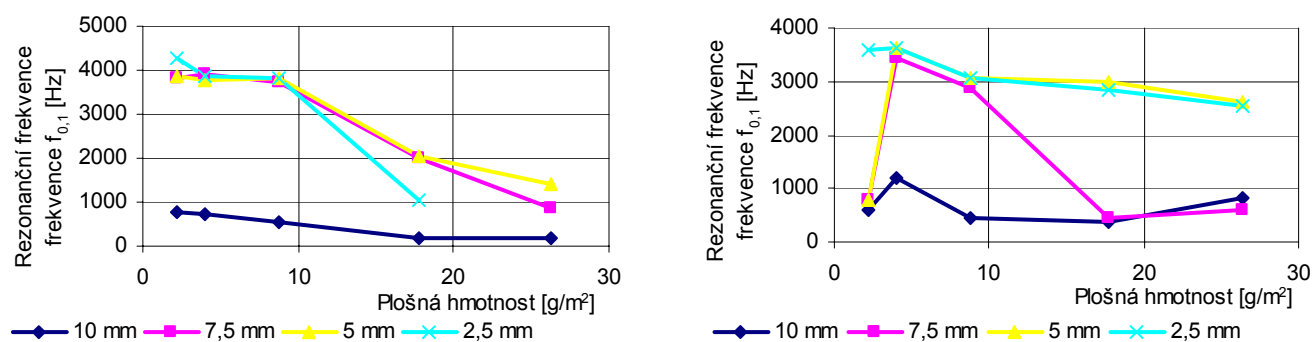
**Příloha č. 9**

Obr. 70: Vliv vzdálenosti odrazivé stěny od nanovlákněné vrstvy na hodnoty činitele zvukové pohltivosti pro různé plošné hmotnosti a odlišné splnění parametru síťování.

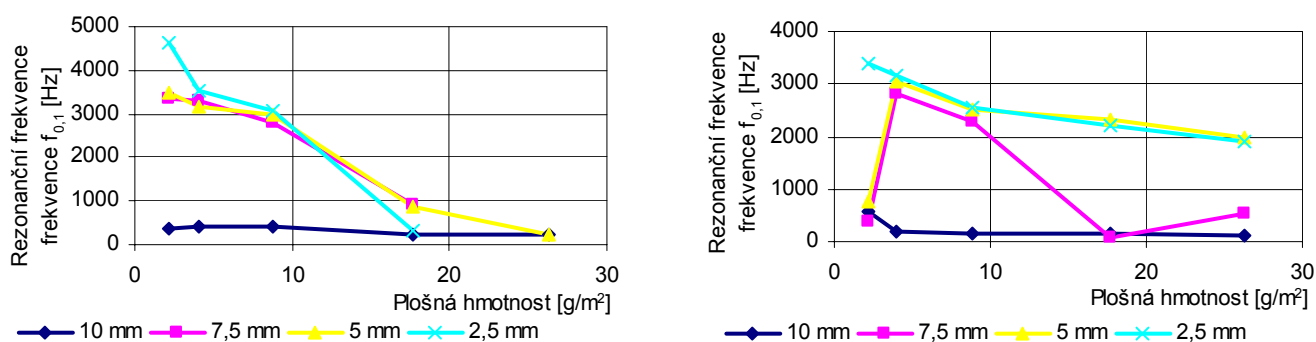


**Příloha č. 10**

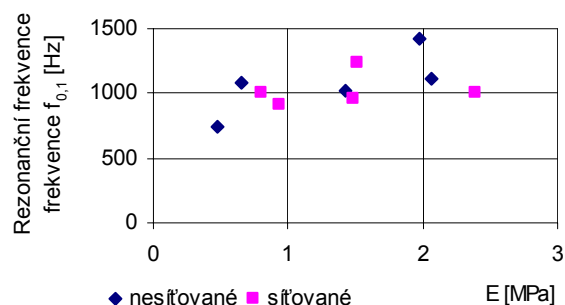
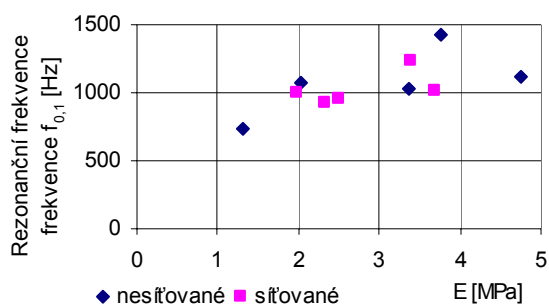
Obr. 71: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na plošné hmotnosti vzorků nesíťovaných (vlevo) a síťovaných (vpravo) pro různá protlačovaná tělesa při průhybu  $w = 4$  mm. Rezananční frekvence stanovena pomocí modulu pružnosti.



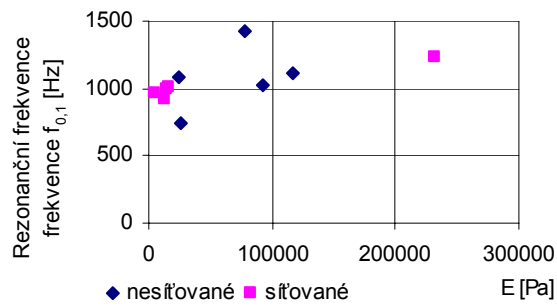
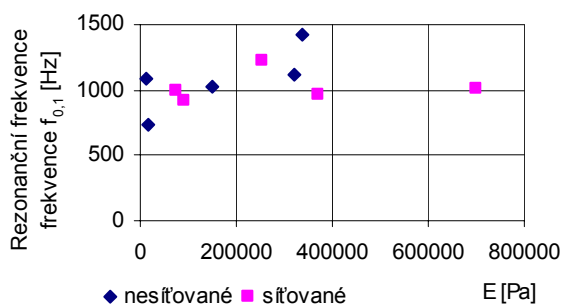
Obr. 72: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na plošné hmotnosti vzorků nesíťovaných (vlevo) a síťovaných (vpravo) pro různá protlačovaná tělesa při průhybu  $w = 2$  mm. Rezananční frekvence stanovena pomocí modulu pružnosti.



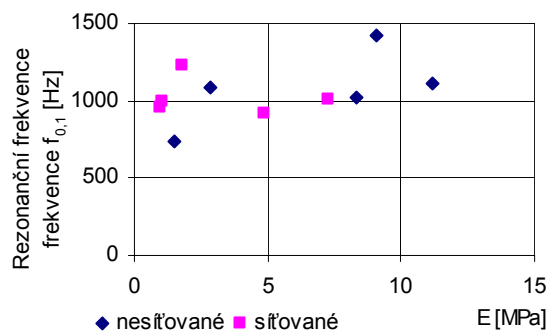
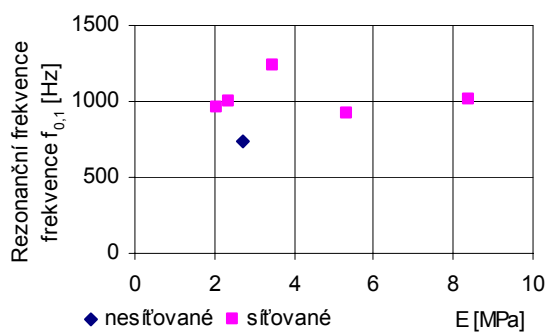
Obr. 73: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na plošné hmotnosti vzorků nesíťovaných (vlevo) a síťovaných (vpravo) pro různá protlačovaná tělesa při průhybu  $w = 1$  mm. Rezananční frekvence stanovena pomocí modulu pružnosti.

**Příloha č. 11**

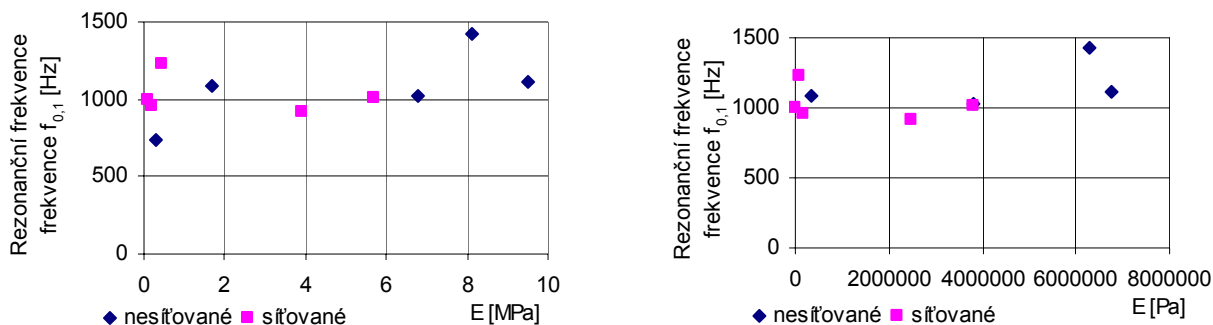
Obr. 74: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na modulu pružnosti vzorků, průměr protlačovaného tělesa 10 mm, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm, hodnota průhybu 4 mm (vlevo) a 3 mm (vpravo).



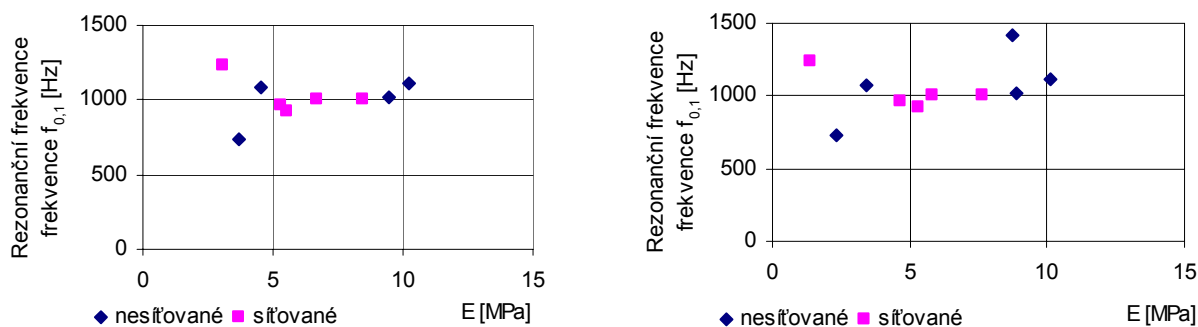
Obr. 75: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na modulu pružnosti vzorků, průměr protlačovaného tělesa 10 mm, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm, hodnota průhybu 2 mm (vlevo) a 1 mm (vpravo).



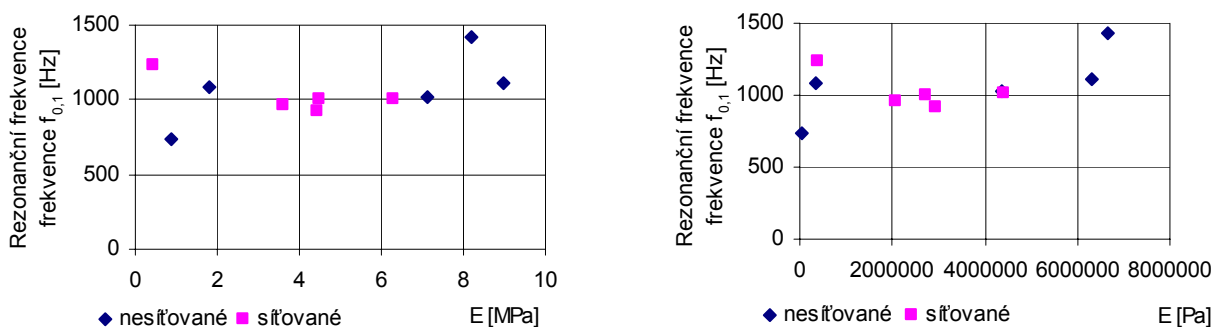
Obr. 76: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na modulu pružnosti vzorků, průměr protlačovaného tělesa 7,5 mm, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm, hodnota průhybu 4 mm (vlevo) a 3 mm (vpravo).



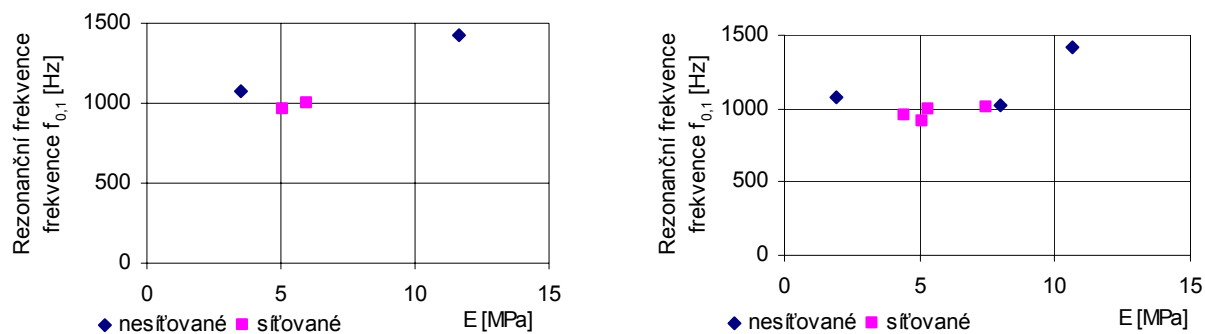
Obr. 77: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na modulu pružnosti vzorků, průměr protlačovaného tělesa 7,5 mm, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm, hodnota průhybu 2 mm (vlevo) a 1 mm (vpravo).



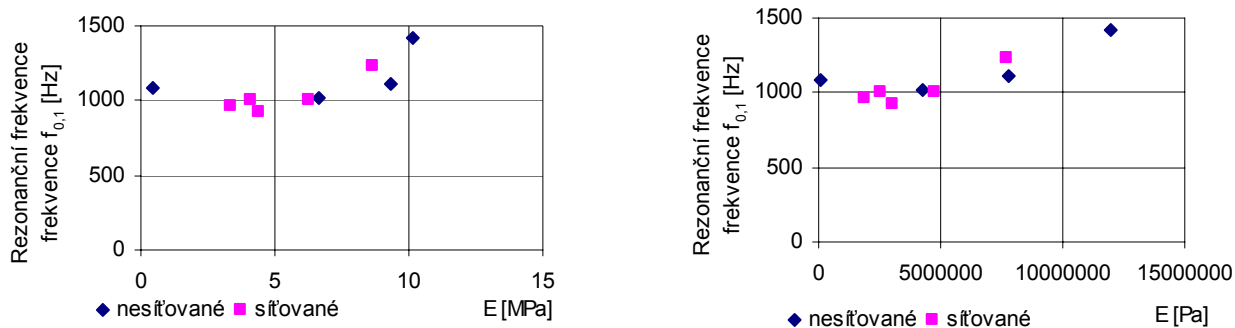
Obr. 78: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na modulu pružnosti vzorků, průměr protlačovaného tělesa 5 mm, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm, hodnota průhybu 4 mm (vlevo) a 3 mm (vpravo).



Obr. 79: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na modulu pružnosti vzorků, průměr protlačovaného tělesa 5 mm, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm, hodnota průhybu 2 mm (vlevo) a 1 mm (vpravo).



Obr. 80: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na modulu pružnosti vzorků, průměr protlačovaného tělesa 2,5 mm, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm, hodnota průhybu 4 mm (vlevo) a 3 mm (vpravo).



Obr. 81: Závislost rezonanční frekvence  $f_{0,1}$  na modulu pružnosti vzorků, průměr protlačovaného tělesa 2,5 mm, vzdálenost odrazivé stěny 30 mm, hodnota průhybu 2 mm (vlevo) a 1 mm (vpravo).